



## **Beskrivelse af det miljøøkonomiske modelapparat anvendt af IFRO til udredning af differentieret arealregulering for NAER i 2014**

Ørum, Jens Erik

*Publication date:*  
2015

*Document version*  
Også kaldet Forlagets PDF

*Citation for published version (APA):*  
Ørum, J. E. (2015). *Beskrivelse af det miljøøkonomiske modelapparat anvendt af IFRO til udredning af differentieret arealregulering for NAER i 2014*. Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet. IFRO Dokumentation Nr. 2015/2

# IFRO Dokumentation



Beskrivelse af det miljøøkonomiske  
modelapparat anvendt af IFRO til  
udredning af differentieret  
arealregulering for NAER i 2014

*Jens Erik Ørum*

## **IFRO Dokumentation 2015 / 2**

Beskrivelse af det miljøøkonomiske modelapparat anvendt af IFRO til udredning af differentieret arealregulering for NAER i 2014

Forfatter: Jens Erik Ørum

Udarbejdet som del af en udredning i henhold til aftale mellem Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi og Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri om forskningsbaseret myndighedsberedskab.

Udgivet: november 2015

Se øvrige udgivelser i serien IFRO Dokumentation her:

[http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro\\_serier/dokumentation/](http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/dokumentation/)

Se myndighedsaftalte udredninger på [www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro\\_serier/udredninger/](http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/udredninger/)

Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi  
Københavns Universitet  
Rolighedsvej 25  
1958 Frederiksberg  
[www.ifro.ku.dk](http://www.ifro.ku.dk)

# Beskrivelse af det miljøøkonomiske modelapparat anvendt af IFRO til udredning af differentieret arealregulering for NAER i 2014

Jens Erik Ørum  
Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi (IFRO)

## Baggrund

Dette notat beskriver de metoder, principper og modeller, der i 2014 blev benyttet af IFRO til beregning og udredning af de produktions- og miljøøkonomiske konsekvenser af en ny, differentieret kvælstofregulering for dansk landbrug. Notatet skal således tjene som bilag til og dokumentation af de miljøøkonomiske analyser af en differentieret kvælstofregulering, der blev gennemført for NAER til brug for et tværministerielt udvalg, med repræsentanter fra NAER, MST og NST, i efteråret 2014.

Styrken ved den miljøøkonomiske model, der beskrives her, er, at den er baseret på en modellering af profitoptimerende adfærd hos landmændene og dermed kan finde og beskrive en omkostningseffektiv tilpasning til et givet udledningskrav (hvor skal virkemidler placeres og hvilke virkemidler og ændringer i arealanvendelsen, der tages i brug), givet reguleringen foregår via afgifter eller kvoter på kvælstoftildeling og kvælstofudledning og tilpasningen besluttet af økonomisk rationelle landmænd.

Modellen har været anvendt til foreløbig beregning af omkostningerne ved en differentieret, miljøøkonomisk rationel regulering af landbrugets kvælstofudledning til vandmiljøet<sup>1</sup>. Det naturvidenskabelige grundlag for model og beregninger er udviklet i samarbejde med eller med væsentlige input fra DCA, AU. Det gælder ikke mindst GIS grundlag vedrørende afgrødefordeling, jordtyper, perkulation og retention samt NLES4 beregninger mv. Anvendelsen af dette grundlag og disse input er imidlertid alene IFRO's ansvar. IFRO har til opgaven udledt udbytteresponsfunktioner for kvælstof baseret på det nuværende normsystem. Modellen har sit udspring i tidligere analyser for bl.a. kvælstofudvalget og Natur- og Landbrugskommissionen, men har i hele forløbet været under udvikling. Fx er et detaljeret retentionskort og NLES4 først kommet til i foråret 2014. Det var forud for arbejdet i 2014 påtænkt, at virkemidler som fx efterafgrøder, tidligt sået vintersæd og minivådområder, værdi af proteinindhold, langtidseffekter for mineralisering og udvaskning mv. skulle indarbejdes modellen i tæt samarbejde med DCA, og IFRO har forhørt sig om der findes eksplicitte udbytteresponsfunktioner ved blandt andet Videncenter for Landbrug, hvor Kalkule-Mark modellen (SEGES 2014) er en oplagt kandidat. Medio 2014 blev det imidlertid klart, at der ikke i det tværministerielle udvalg var behov for komplekse miljøøkonomiske beregninger på et geografisk differentieret, solidt og detaljeret naturvidenskabeligt grundlag, men brug for simple beregninger, med den af Miljøstyrelsen foreslåede GSA model, baseret på en simpel udvaskningsmodel med ens marginaludvaskning for alle landsdele, afgrøder og kvælstofniveauer med anvendelse af administrativt, og ikke miljøøkonomisk, fastsatte virkemidler. Se Jacobsen (2015) for en nærmere beskrivelse af GSA modellen.

---

<sup>1</sup> Beregningerne indgik i et upubliceret notat, der blev udarbejdet og præsenteret for Fødevareministeriet den i efteråret 2014, der udover analyser med nærværende model (MØK modellen) også omhandlede en beskrivelse af GSA-modellen (Jacobsen, 2015).

Der blev gjort utallige forsøg og anvendt mange ressourcer på at få den miljøøkonomiske og adfærdsbaserede model til at simulere effekterne af GSA-modellen og den nuværende regulering, men det var et tilbagevendende problem, at modellen på grund af sin optimeringstilgang ikke kan tvinges til at vælge den eksisterende arealanvendelse, eksisterende placering af virkemidler eller påvise den politisk/administrativt fastsatte, eksisterende, officielle udledning fra de 23 vandoplande.

Det blev i forløbet ligeledes klart, at DCA udredningsressourcer ikke længere skulle anvendes til udvikling af det naturvidenskabelige grundlag for IFRO's miljøøkonomiske model, men til det såkaldte virkemiddelkatalog udgivet af Naturstyrelsen (Eriksen et al. 2014). Nærværende notat var i lang tid et åbent dokument, hvor IFRO dokumenterede, hvorledes input fra DCA blev integreret i IFRO miljøøkonomiske model. Notatet giver derfor en grundig beskrivelse af udviklingen i modelgrundlag og metoder til og med det tidlige efterår 2014. Med henblik på at dokumentere resterende, delvist udestående elementer af modelarbejdet, der fortsat var i proces fx responsfunktioner for sædskifter, eftervirkning husdyrgødning mv. er disse, mindre udførligt, dokumenteret til sidst i notatet. Det har senere, som en opfølgning på det såkaldte Pilotprojekt for ny arealregulering (VFL 2014a), vist sig muligt at basere de miljøøkonomiske beregninger på kvælstofrespons (værdi af protein og langtidsvirkning) på den i Pilotprojektet af SEGES udviklede Kalkule Mark model.

### Modelbeskrivelse

I den miljøøkonomiske model reguleres kvælstofudledningen i al sin enkelthed ved hjælp af kvoter eller afgifter på henholdsvis kvælstofinput og kvælstofoutput, hvor det antages, at de enkelte bedrifter vil søge en økonomisk rationel tilpasning af areal- og gødningsanvendelse til disse kvoter og afgifter. Virkemidler som fx efterafgrøder, energiafgrøder og udtagning betragtes modelteknisk set som sædskifteændringer. Modellen kan vise hvilke virkemidler og tilpasninger, der er miljøøkonomisk optimale ved en given målsætning. Modellen kan ligeledes vise, hvorledes tilpasningsomkostningerne fordeler sig over de forskellige oplande, jordtyper, sædskifter og bedrifter. Fordeling af eventuelle kvoter samt omfordeling af beregnede tab og gevinster på tværs af bedrifter ved en given regulering er modelteknisk uden betydning (har ingen adfærdsmæssig betydning) og håndteres derfor ikke eksplicit i modellen. Modelteknisk er det principielt underordnet om tildeling og udledning af kvælstof reguleres med afgifter eller kvoter, forudsat sidstnævnte kan handles frit mellem landmændene i fx et opland. I praksis opererer modellen kun med afgifter. Løsninger af en regulering med kvoter ville skulle identificeres ved en iterativ proces, hvor afgifterne (skyggeprisen på kvoten) øges til et niveau, hvor tildeling eller udledning af kvælstof fra fx et givet opland netop svarer til kvoten. Modellens datagrundlag fremgår af tabel 1.

**Tabel 1.** Datagrundlag for den miljøøkonomiske model

<b>Datagrundlag</b>	<b>Primær kilde eller metode</b>
Arealanvendelse	Markblokdata fra DCA GLR registeret 2009-2011
Jordtyper og retentionsdata	Markblokdata fra DCA
Sædskiftebeskrivelser	Konstrueret af IFRO på grundlag af GLR arealanvendelse 2009-2011
Udbytterresponsfunktioner	Udarbejdet af IFRO på grundlag af landsforsøg samt officielle data for referenceudbytter og (18 pct.) reduceret kvælstofnorm for afgrøder og jordtyper
Udvaskningsmodel	Tilpasset NLES4 model, hvor udledningsparametre er estimeret af IFRO på grundlag af DCA NLES4 modelberegninger for en række sædskifter i godt 600 10 km x10 km, landsdækkende, grid-celler med hhv. ler og sandjord.

Her opstilles modellen for landmandens maksimering af afkast ved optimalt valg af arealanvendelse under antagelse om økonomisk rationel adfærd samt mulighed for handel med tildelte kvoter for kvælstoftildeling og kvælstofudledning med markedspris  $\lambda_U$  og  $\lambda_N$  samt jordrente  $\lambda_J$ :

$$\pi(\lambda_N, \lambda_U) = A(\lambda_N Q_N + \lambda_U Q_U) + \max_{a_i, x_i} \sum_{i=1}^n a_i (P_i(x_i) - \lambda_N x_i - \lambda_U (1 - R) U_i(x_i))$$

$Q_N$ og $Q_U$	Kvoter for hhv. kvælstoftildeling og kvælstofudledning
$a_i$	Arealandel for sædskifte $i$
$x_i$	Kvælstoftildeling til sædskifte $i$
$P_i(x_i)$	Dækningsbidraget for sædskifte $i$ er en funktion af kvælstoftildelingen, hvor både udbytteeffekt og omkostninger til kvælstof er indregnet.
$U_i(x_i)$	Udvaskning af kvælstof fra rodzonen fra sædskifte $i$ er en funktion af kvælstoftildelingen
$R$	Kvælstofretention
$st. \sum_i a_i = A$	Sædskiftet kan justeres, men samlet areal er uændret
$st. \sum_i v_i = V$	Areal med vintersæd kan hverken flyttes eller øges
$st. \sum_i s_i \leq S$	Areal med specialafgrøder kan hverken flyttes eller øges
$st. \sum_i r_i = R$	Areal med grovfoder fastholdes

Ved maksimering af det samlede dækningsbidrag skal første-ordenordens-betingelserne for optimal kvælstof tilførsel  $x_i$  og arealanvendelse  $a_i$  være opfyldt. For kvælstoftildelingens førsteordensbetingelser for de enkelte marker gælder:

$$\frac{dP_i(x_i)}{dx_i} - \lambda_N - \lambda_U (1 - R) \frac{dU_i(x_i)}{dx_i} = 0$$

Det fremgår, at størrelsen og værdien af tildelt kvote  $Q_N$  og  $Q_U$  er uden betydning for den optimale tildeling af kvælstof. Den miljøøkonomisk optimale tildeling af kvælstof til de enkelte afgrøder afhænger derimod alene af kvotepris for kvælstofinput, kvotepris for kvælstofudledning samt markens kvælstofretention og afgrødens marginaludvaskning for kvælstof.

For landmanden vil det imidlertid være driftsøkonomisk optimalt at pulje bedriftens kvælstof og fordele det til afgrøderne uden hensyntagen til markernes varierende retention og uden hensyntagen til afgrødernes forskellige marginaludvaskning. Landmanden kan udlede en skyggepris for den puljede kvælstofkvote. Ved handel med kvælstofkvote, vil kvoteprisen afløse/udtrykke landmandens skyggepris for kvælstof.

For førsteordensbetingelser for allokering af markarealer til den enkelte afgrøde gælder:

$$P_i(x_i) - \lambda_N x_i - \lambda_U (1 - R) U_i(x_i) - \lambda_J = 0$$

Det fremgår, at markens retention og afgrødens kvælstofudledning, samt kvotepriserne for kvælstoftildeling og kvælstofudledning har afgørende (drifts- og miljøøkonomisk) betydning for hvilken afgrøde, der dyrkes på den enkelte mark.

Når begge førsteordensbetingelser er opfyldt gælder, at kvælstoftildelingen til de enkelte afgrøder alene er bestemt af skygge/kvotepris på kvælstofinput, mens arealanvendelsen (valget af afgrøder) i høj grad er bestemt af markernes varierende retention og afgrødernes forskellige kvælstofudvaskning ved en given kvotepris for kvælstofudledning. I en modelleringssammenhæng har kvote/skyggeprisen på kvælstofudledning primært betydning for en miljøøkonomisk optimal arealanvendelse, mens kvotepris/skyggepris for kvælstofinput primært har betydning for, hvor meget kvælstof, der udvaskes fra de enkelte afgrøder uafhængigt af markenes retention. Ligevægtsprisen for kvote på kvælstofinput og kvælstofudledning vil naturligvis være gensidigt afhængige af hvor store kvoter der udstedes for kvælstoftildeling og -udledning. For at kunne beregne disse ligevægt er det af stor betydning at kunne forstå og modellere, hvorledes arealanvendelsen tilpasses.

### Tildeling og omfordeling af kvoter

Kvælstofudledningen kan med den valgte model reguleres med kvote for kvælstoftildeling, blot en kvote for kvælstofudledning eller en kombination af disse. Uden kvote for kvælstofinput vil der alt andet lige være en større udvaskning fra de enkelte afgrøder og det vil derfor være nødvendigt, at øge afgiften for kvælstofudledning for at opnå en given kvælstofudledning fra et vandopland. Ved en meget begrænset kvote for kvælstoftildeling reduceres udledningen alt andet lige og dermed reduceres kvoteprisen kvælstofudledning. For den enkelte bedrift, har det naturligvis stor økonomisk betydning, hvor store kvoter, der udstedes og hvorledes de uddeles. For samfundet gælder det om, pr. opland, at vælge den miljøøkonomisk (velfærdsøkonomiske) optimale kombination af disse kvoter. Det kan beregnes, hvorledes forskellige bedriftstyper påvirkes af forskellige kvoter, og der er eksperimenteret med forskellige modeller for tildeling af kvoter. Det er dog væsentligt at forstå, at de samlede omkostninger og løsninger ved forskellige kvotescenarier, med den her skitserede model, kan beregnes uden hensyn til hvorledes kvoterne tildeles.

Handel med kvoter er ikke omkostningsfrit og der vil altid være en træghed i handlen, der medfører, at kvoterne ikke allokeres miljøøkonomisk optimalt. Det er derfor samfundsøkonomisk optimalt og oplagt, som reference, at vælge en fordelingsmodel, hvor kvoterne initialt fordeles, så fordelingen bedst muligt svarer til den fordeling, der opnås ved handel med kvoterne til ligevægt. Tilsvarende vil "ens udledningskvote til alle", udgøre en reference som den kvotefordelingsmodel, der medfører de største samfundsøkonomiske omkostninger og velfærdstab og de størst mulige initiale fordelingsproblemer. Ens kvote til alle vil således medføre utilsigtede gevinster for de bedrifter, der har en høj retention og derfor ikke har behov for en kvote, og utilsigtede omkostninger for de bedrifter, der har en lav retention og derfor, uanset at de tilpasser arealanvendelsen væsentligt, har brug for en højere udledningskvote end de tildeles ved en model med ens kvote til alle. I praksis vil en udledningskvote  $Q$  baseret på målsætning  $M$  og gennemsnitlig retention for vandoplandet  $R_{gns}$  medføre begrænset kvotehandel og mindst mulige fordelingsproblemer:  $Q = M \frac{1-R_{akt}}{1-R_{gns}}$

### Lidt modelteknik

Betrakt modellen opskrevet ovenfor. Den økonomisk rationelle driftsleder vælger, for et givet areal  $A$  den arealanvendelse,  $a$ , der optimerer det samlede dækningsbidrag  $\pi$  under hensyntagen til skyggepriser på tildelt ( $\lambda_N$ ) og udledt kvælstof ( $\lambda_L$ ). Det enkelte areal,  $A$ , er karakteriseret ved at tilhøre et opland  $o$  (der er 23 sådanne hovedvandoplande), en jordtype  $j$  (ler eller sand) og en retentionsklasse  $r$  (i spring af 20 pct. retention).  $P$  er dækningsbidrag for en given arealanvendelse.

Gennem restriktionerne sikres, at den simulerede driftsleder tager hensyn til, at arealet har en begrænset størrelse, at der er grænser for hvilke specialafgrøder  $S$ , der kan dyrkes på det enkelte areal og hvor mange kvotebelagte specialafgrøder (fx roer, kartofler og frøgræs), der kan dyrkes på bedriften, og hensyn til, at der på tværs af arealerne skal produceres en given mængde kvægfoder,  $R$ , svarende til fx den nuværende produktion.

I de aktuelle analyser er antal bedrifter reduceret væsentligt, således, at kun de største er bevaret (er identificerbare), mens de øvrige bedrifter er opløst og slået sammen under hensyntagen til jordtype og sædskifter, retention og husdyrhold. Det bør i princippet ikke påvirke resultaterne samlet set, men betyder selvfølgelig, at ikke alle delresultater umiddelbart kan henføres til bestemte bedrifter. Alle bedrifter, uanset størrelse, er dog nedbrudt i henhold til DMI klimagrid (10 x 10 km) og et klimagrid kan i modellen kun tilhøre ét vandopland. Derfor kan der fx ikke simuleres problemer, incitament, barrierer og effekter af flytning af (GSA) virkemidler på tværs af vandoplande såvel inden for bedrifterne som mellem bedrifterne eller mellem 10 km x 10 km grids. Disse forenklinger er primært gennemført for opnå en mere overskuelig model og for at fastholde muligheden for en nærmest momentan, interaktiv løsning af modellen. Dette letter arbejdet med udvikling og afprøvning af modellen væsentligt. Modellen er imidlertid forberedt til også at kunne operere med en fuld opløsning på fx delvandoplande og enkeltbedrifter, hvilket vil være nyttigt, ved en meget præcis opgørelse af fordele og ulemper på bedriftsniveau ved forskellige reguleringsscenarier. Men de samlede økonomiske og miljømæssige resultater for vandoplande, delvandoplande, grids og aggregerede bedriftsgrupper vil som nævnt ikke påvirkes.

For at håndtere/operationalisere optimeringen af arealanvendelsen og sikre de agronomiske og sædskiftemæssige begrænsninger, er der i modellen valgt at operere med et begrænset antal (16) firårige ligevægtssædskifter  $\alpha \in [1,16]$ , hvor diverse agronomiske og sædskiftemæssige regler altid er overholdt. I disse sædskifter er afgrøderækkefølgen uændret, alle afgrøder dyrkes hvert år og altid i samme relative forhold. Herved sikres det bl.a., at der altid er plads til udlæg af græs i sædskifter med frøgræsproduktion, og plads til vårsæde afgrøder som fx vårsæd efter efterafgrøder osv.

Ved en optimering af arealanvendelsen er det i modellen valgt, at der ikke er frit valg mellem alle mulige sædskifter. Denne begrænsning er indført for at forenkle tilpasnings- og optimeringsprocessen. Det er således valgt, at sædskifter med en given grovfoderproduktion kun kan erstattes af sædskifter med en tilsvarende grovfoderproduktion. Det betyder, at sædskifter med frøgræs, roer og kartofler kan erstattes af mere kornrige sædskifter, men ikke altid omvendt. Andelen af vintersæd kan ikke øges og der kan altid skiftes til sædskifter med mere vårbyg og efterafgrøder, samt til "sædskifter" med kontinuert brak eller kontinuert vårbyg med efterafgrøder.

Disse begrænsninger knytter sig til den mere grundlæggende begrænsning, at husdyrholdet og øvrige kapaciteter er fastholdt i modellen, der således ikke beregner omkostningerne eller fordele ved en tilpasning af disse kapaciteter ved en given kvælstofregulering på hverken kort eller langt sigt.

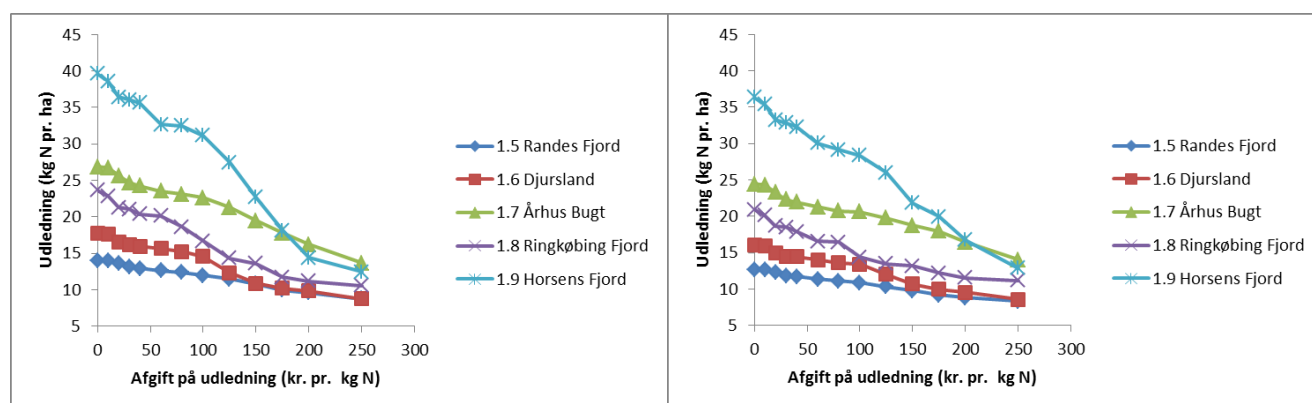
Ved løsning af modellen, vælges der for den enkelte jordtype, den enkelte retentionsklasse og det enkelte nuværende sædskifte, den sædskifteændring, der med en given kvote/skyggepris på kvælstofinput og -udledning giver det størst mulige dækningsbidrag. De mulige sædskifteændringer er bestemt af det nuværende sædskifte, men den valgte justering afhænger alene af kvoter/skyggepriserne på kvælstofinput og kvælstofudledning. Modellen er således konstrueret, så beregningerne og den optimale løsning for den



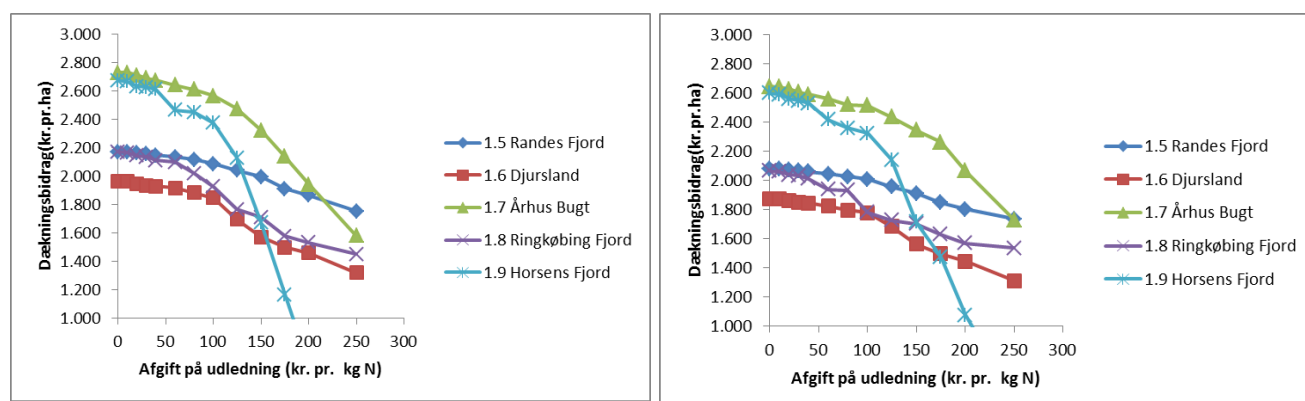
enkelte plet jord, er uafhængig af hvilke andre sædskifter, retentionsklasser og jordtyper, der er på bedriften og i oplandet. Den samlede effekt af skygge/kvotepriserne på udledning og økonomi i et opland er således alene en afledt effekt af den optimale adfærd på den enkelte plet jord. Modellen (og den økonomisk rationelle landmand) disponerer så at sige alene på grundlag af skygge/kvotepriserne, og uden tanke for "kvælstofposen" eller udledningsmålsætningen for det pågældende opland.

### Eksempler på modelkørsler

Modellen kan som nævnt ikke direkte tilpasse kvælstof- og arealanvendelse mv. til en given udledning, men til en given skyggepris (eller kvote) på hhv. kvælstofinput og kvælstofudledning. I stedet for at lede efter den skyggepris på kvælstofinput og kvælstofudledning, der resulterer i det størst mulige dækningsbidrag for en give udledning, er der beregnet udledning, dækningsbidrag, kvælstofforbrug og arealanvendelse for en lang række kombinationer af skyggepriser. I det følgende vises eksempler på analyser med den miljøøkonomiske model, hvor skyggeprisen varierer fra 0 til 250. kr. pr. kg kvælstofudledningskvote, og hvor kvoten for tildelt kvælstof er fastsat ved hjælp af en skyggepris på hhv. 0 og 4 kr. pr. kg N. I figur 1 og 2 sammenlignes hhv. udledning og dækningsbidrag for fem udvalgte vandoplande.

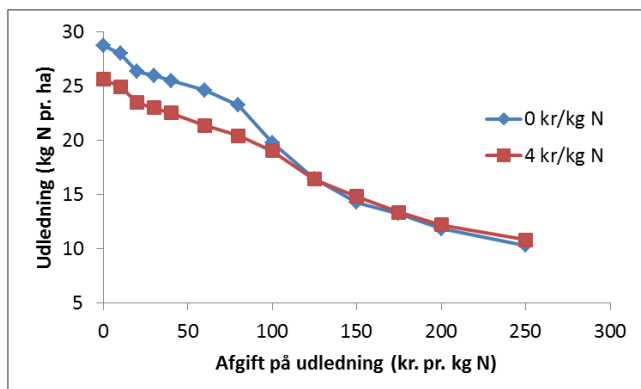


**Figur 1.** Udledning ved stigende skyggepris på kvælstofudledning ved kvælstofinputkvote svarende til hhv. 0 (tv.) og 4 (th.) kr. skyggepris pr. kg N for fem udvalgte vandoplande.

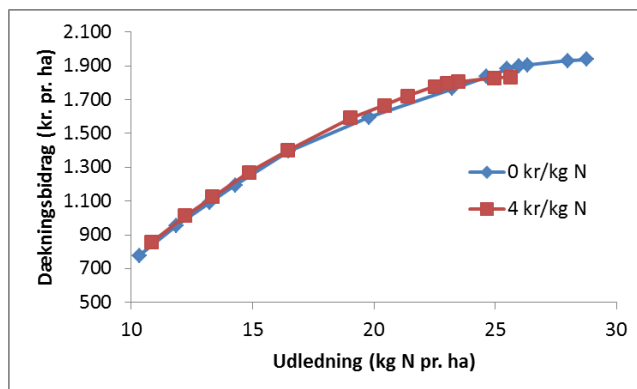


**Figur 2.** Dækningsbidrag ved stigende skyggepris på kvælstofudledning ved kvælstofinputkvote svarende til hhv. 0 (tv.) og 4 (th.) kr. skyggepris pr. kg N for fem udvalgte vandoplande.

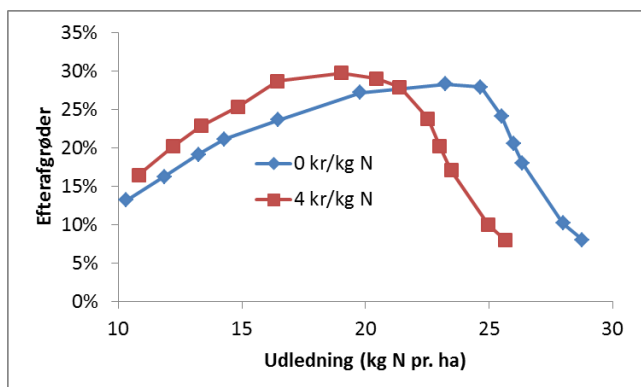
I figur 3 vises kvælstofudledning ved en given afgift/skyggepris på kvælstofudledning, mens figur 4, 5 og 6 viser hhv. dækningsbidrag, andel efterafgrøder og andel udtagning ved en given kvælstofudledning til vandopland Limfjorden.



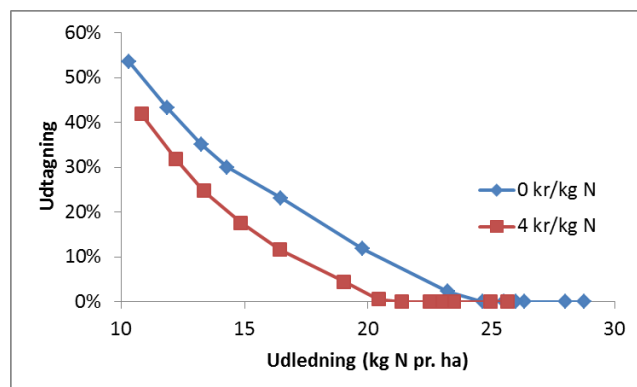
**Figur 3.** Kvælstofudledning (kg N pr. ha) fra vandopland Limfjorden ved stigende afgift (skyggepris) på kvælstofudledningskvote ved to niveauer af kvælstofinputkvote svarende til en skyggepris på hhv. 0 og 4 kr. pr. kg N.



**Figur 4.** Dækningsbidrag (kr. pr. ha) ved stigende kvælstofudledning (kg N pr. ha) til vandopland Limfjorden ved to niveauer af kvælstofinputkvote svarende til en skyggepris på hhv. 0 og 4 kr. pr. kg N.



**Figur 5.** Efterafgrøde andel (pct.) ved stigende kvælstofudledning (kg N pr. ha) til vandopland Limfjorden ved to niveauer af kvælstofinputkvote svarende til en skyggepris på hhv. 0 og 4 kr. pr. kg N.



**Figur 6.** Udtagning (pct.) ved stigende kvælstofudledning (kg N pr. ha) til vandopland Limfjorden ved to niveauer af kvælstofinputkvote svarende til en skyggepris på hhv. 0 og 4 kr. pr. kg N.

Disse ovenfor viste eksempler skal alene belyse mulighederne for at gennemføre regulerings- og tilpasningsscenarier med den miljøøkonomiske model. Bemærk, at disse arealandele mv. er et resultat af en miljøøkonomisk optimal tilpasning til et givet udledningskrav. Bag disse arealandele skjuler sig en stor rumlig variation i arealanvendelsen, der afhænger af retention, jordtype og afgrødevalg mv.

Detaljerede (rå) resultater for alle 23 vandoplande findes i et [regneark, der kan hentes her](#). I logfilen er der opsamlet gennemsnitlige resultater pr. vandopland for nogle få, udvalgte parametre som fx dækningsbidrag, udledning og efterafgrøder. Modellen er dog konstrueret, så langt flere/alle detaljer vedrørende tilpasning af sædskifte helt ned på jordtype og bedriftsniveau kan logges (men fylder, slører overblikket og tager tid).

## Metoder, principper og modeller til beregning af normer, udledning og udbytter ved en differentieret kvælstofregulering

I det følgende beskrives flere af de agronomiske og tekniske aspekter af ovenstående modeller grundigere for at sikre dokumentation.

### Udbyttefunktioner

Udbyttefunktionerne for de forskellige afgrøder er udtrykt på to forskellige måde, dels en klassisk polynomieform 1), dels en agronomisk form 2), hvor  $y$  er udbytte,  $x$  er tildelt kvælstof,  $c$  er udbytte, når der ikke tildeles kvælstof,  $Y$  er udbyttmaksimum,  $x_0$  er plantetilgængelig mineraliseret kvælstof til rådighed for afgrøden og  $\bar{x}$  er den mængde kvælstof (tildelt + mineraliseret), der kræves for at opnå det biologiske udbyttmaksimum ( $Y$ ), mens  $a$  og  $b$  er simple responsparametre, der ikke kan tillægges en særlig agronomisk fortolkning:

$$\begin{aligned} 1) \quad y &= ax^2 + bx + c \\ 2) \quad y &= Y \left( 2 \left( \frac{x+x_0}{\bar{x}} \right) - \left( \frac{x+x_0}{\bar{x}} \right)^2 \right) \end{aligned}$$

Responsparametre kan ved ren matematisk udledning, direkte overføres mellem de to formulering med følgende formler:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{Y}{\bar{x}^2} & b &= 2Y \left( \frac{1}{\bar{x}} - \frac{x_0}{\bar{x}^2} \right) & c &= Y \left( 2 \frac{x_0}{\bar{x}} - \left( \frac{x_0}{\bar{x}} \right)^2 \right) \\ \text{og} \quad Y &= a \left( \frac{-b}{2a} \right)^2 + b \frac{-b}{2a} + c & \bar{x} &= \sqrt{-Y/a} & x_0 &= \bar{x} \left( 1 - \frac{b\bar{x}}{2Y} \right) \end{aligned}$$

Bemærk, at  $-\frac{b}{2a}$  udtrykker den mængde tilført kvælstof, der kræves for at opnå det biologisk maksimale udbytte.

Det er valgt at beskrive udbyttefunktioner for de forskellige afgrøder og jordtyper med den agronomiske formulering. Herved er det muligt eksplicit at justere for og skelne mellem ændringer i udbyttepotentiale  $Y$  og ændringer i plantetilgængeligt kvælstof  $x_0$ , som følge af fx den teknologiske udvikling eller dynamiske effekter af ændret husdyrtæthed og kvælstofregulering. I andre sammenhænge, kan det imidlertid være bekvemt, at benytte den klassiske formulering.

For en række afgrøder har forfrugter (den foregående afgrøde) en væsentlig betydning for kvælstofbehov og udbyttepotentialet. Med brug af de agronomiske udbyttefunktioner kan disse effekter direkte udstykkes i henholdsvis  $x_0$  og  $Y$  parameteren.

### Proteinindhold og værdikorrigeret udbytte

Kvælstoftildeling har stor betydning for afgrødernes kerne-, halm- og kvælstofudbytte. Den driftsøkonomiske værdi af proteinindhold og halm afhænger i høj grad af, om afgrøden skal anvendes til foder eller halmen fx skal presses, oplagres og sælges eller anvendes i husdyrholdet. Se fx Håndbog til Driftsplanlægning (VFL 2014b, side 8). Proteinindholdet i korn har været faldende over tid, og det diskuteres heftigt hvorvidt det skyldes langtidseffekten de stadigt skrappe gødningsnormer (oprindeligt

10 pct. nu 18 pct. under det økonomisk optimale), ensidigt fokus på udbytte i forædlingsarbejdet, klimaforandringerne eller noget helt fjerde. Værdien af protein og halm indgår imidlertid ikke eksplicit i de gennemførte analyser. Når og hvis værdien af afgrødernes proteinindhold på et senere tidspunkt ønskes inddraget i analyserne, er modellen forberedt til dette. Udbytteresponsparametre for proteinudbytte kan estimeres på grundlag af de samme forsøg, der ligger til grund for beregning af udbytteresponsparametre for kerneudbytte. I nærværende analyser er der hidtil kun indregnet værdi af kerneudbytte. I det følgende beskrives det, hvorledes værdi af fx protein kan indkalkuleres i en værdikorrigeret udbyttefunktion.

Der ønskes en agronomisk formuleret værdi-korrigeret udbyttefunktion, men den første del af regnestykket gennemføres med brug af de klassiske andegradspolynomier for kerne og protein.

Relativt proteinindhold ( $P$ ) ved tildeling af den mængde kvælstof  $\bar{x}_k - x_0$ , der kræves for at opnå maksimalt kerneudbytte anvendes således som en slags reference eller kalibreringspunkt.

$$P = y_p(\bar{x}_k - x_0) / y_k(\bar{x}_k - x_0)$$

$$y_k(x) = Y_k \left( 2 \left( \frac{x + x_0}{\bar{x}_k} \right) - \left( \frac{x + x_0}{\bar{x}_k} \right)^2 \right)$$

$$y_p(x) = Y_p \left( 2 \left( \frac{x + x_0}{\bar{x}_p} \right) - \left( \frac{x + x_0}{\bar{x}_p} \right)^2 \right)$$

Når  $x = \bar{x}_k - x_0$  er  $y_k = Y_k$  og dermed kan det udledes, at  $P = y_p / Y_k$

$$P = Y_p \left( 2 \left( \frac{\bar{x}_k}{\bar{x}_p} \right) - \left( \frac{\bar{x}_k}{\bar{x}_p} \right)^2 \right) / Y_k$$

Først antages eller beregnes det relative proteinindhold  $P$  (pct.) i kernen (her målt ved 15 % vandindhold) ved tildeling af den mængde kvælstof (tildelt plus mineraliseret)  $\bar{x}_k$ , der giver det biologisk maksimale kerneudbytte  $Y_k$ :

$$P[\%] = \frac{Y_p \left[ \frac{kg}{ha} \right]}{Y_k \left[ \frac{hkg}{ha} \right]} \left( 2 \left( \frac{\bar{x}_k}{\bar{x}_p} \right) - \left( \frac{\bar{x}_k}{\bar{x}_p} \right)^2 \right)$$

Med brug af den således beregnede reference proteinprocent  $P$  samt prisen for hhv. kerne  $p_k$  og protein  $p_p$  beregnes dernæst to korrektionsfaktorer  $F_k$  og  $F_p$ :

$$F_k[] = 1 - P[\%] * 100 * \frac{p_p \left[ \frac{Kr.}{kg} \right]}{p_k \left[ \frac{Kr.}{hkg} \right]} \quad F_p[] = \frac{p_p \left[ \frac{Kr.}{kg} \right]}{p_k \left[ \frac{Kr.}{hkg} \right]}$$

Endeligt beregnes der klassiske  $a_v$ ,  $b_v$  og  $c_v$  parametre, for den værdikorrigerede udbyttefunktion således:

$$a_v = F_k a_k + F_p a_p \quad b_v = F_k b_k + F_p b_p \quad c_v = F_k c_k + F_p c_p$$

Et simpelt eksempel på brug af formlerne er vist i tabel 2, hvor kornpris  $p_k$  er 120 kr. pr. hkg, proteinpris  $p_p$  er 3 kr. pr. kg og proteinindhold P ved max kerneudbytte kan beregnes til 11,7 pct.,  $F_k$  til 0,7569.. og  $F_p$  til 0,02083..:

**Tabel 2.** Et eksempel på brug af formlerne

	Kerne	Protein	Værdikorrigeret kerne
$Y$	$100 \left[ \frac{hkg}{ha} \right]$	$1200 \left[ \frac{kg}{ha} \right]$	$100,13 \left[ \frac{hkg}{ha} \right]$
$x_0$	88	88	88
$\bar{x}$	300	360	311,24
$a$	-0,0011	-0,0092	-0,0010
$b$	0,4711	5,0370	0,4615
$c$	50,0622	514,9629	48,6227

I det viste eksempel øges det maksimale kerneudbytte fra 100 til 100,13 hkg pr. ha, men det kræver ekstra 11,24 kg N pr. ha (311,24-300,00) at opnå dette udbytte, når der korrigeres for værdi af proteinindhold i kernen. Bemærk, at kun udbyttet ændres med den valgte løsning. Bemærk også, at proteinindholdet i korn normalt udtrykkes ved den relative andel af protein i kernetørstof, mens der ved afregning af kerne regnes med 15 pct. vandindhold, dvs.:  $F_k[] = 1 - P[\%] * 100/1,15 * p_p \left[ \frac{Kr.}{kg} \right] / p_k \left[ \frac{Kr.}{hkg} \right]$

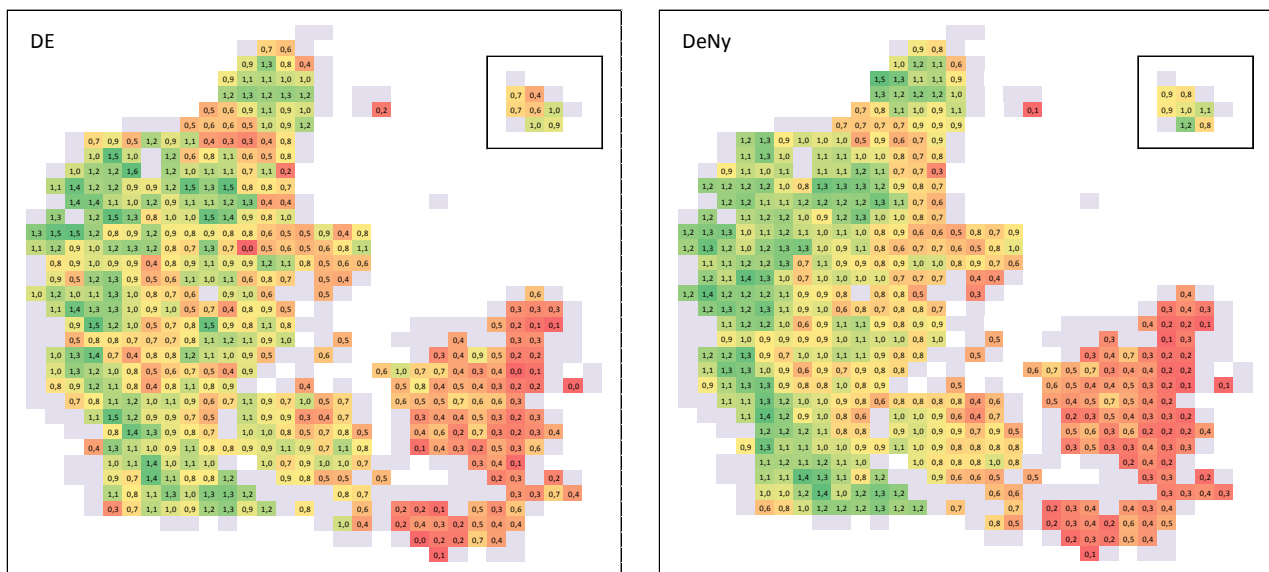
### Husdyrgødning og dynamiske effekter af kvælstofregulering

Udnyttelse og eftervirkning af husdyrgødning samt dynamisk effekt af ændringer i kvælstoftilførslen har stor betydning for udbytter og kvælstofudvaskning. I de gennemførte analyser er der hidtil ikke korrigeret for langtidseffekt af tidligere og fremtidig regulering, men der er forsøgt korrigeret for anvendelse af husdyrgødning. Ved en husdyrtæthed på 1 DE pr. ha, er det antaget, at der med de gældende udnyttelseskrav, med tiden er opbygget en eftervirkning på 10 kg N pr. ha kvælstof til rådighed for afgrøder og udvaskning. Det er antaget, at husdyrgødningen er fordelt jævnt over tid og i rum. Således er det antaget, at planteavlsbrug og husdyrbrug (også i områder med en stor husdyrtæthed) har modtaget lige meget husdyrgødning pr. ha, og dermed har opbygget den samme (høje) kvælstofeftervirkning.

Dynamiske effekter af en ændret kvælstoftildeling er et langt stykke hen ad vejen inkluderet i den modelberegnete udvaskning med NLES4, hvor ikke kun den aktuelle kvælstoftilførsel, men også tidligere års sædskifte og kvælstoftilførsel, der har stor betydning for udvaskningen, indgår). Dynamiske effekter vil derfor uden problemer også kunne inddrages i udbytteberegningerne. Med brug af de agronomisk formulerede udbyttefunktioner er det alene et spørgsmål om at justere  $x_0$  parameteren, der udtrykker, hvor meget mineraliseret kvælstof, der er til rådighed for afgrøden. Med den metode, kan det på grundlag af Skejby-pilotprojekt-notat (VFL 2014) om dynamiske effekter af reduceret kvælstoftildeling, beregnes, at en varig reduktion i kvælstoftildelingen, som diskuteret i Ørum og Schou (2015), slår i gennem med ca. 50 pct. i  $x_0$  parameteren. Gødes der fx med 20 kg N mindre pr. ha pr. år, vil det med tiden reducere mængden af mineraliseret kvælstof til rådighed for afgrøden med 10 kg N pr. ha. Det gælder/må antages, at effekten af en ændret kvælstoftildeling er kraftigst de første år og derefter aftager væsentligt med tiden. Tidshorisonter fremgår ikke af nævnte notat, men det må antages at den største del af effekten er opnået efter 5-10 år.

En ændret (reduceret) husdyrtæthed eller en ændret (reduceret) kvælstoftildeling vil således efter nogle år resultere i et større udbyttetab og formentlig en større miljøgevinst end først beregnet, med mindre der løbende eller ved implementeringen tages højde for ændringen i den mængde mineraliseret kvælstof, der er til rådighed for afgrøderne. For miljø- og driftsøkonomiske analyser er det derfor vigtigt (vigtigere) at have styr på, hvor meget handels- og husdyrgødning, der har været tildelt i tidligere år (end den aktuelle tildeling og udnyttelse af husdyrgødning).

Figur 7 viser gennemsnitlig husdyrtæthed opgjort for klimagrid celler (egen beregning på grundlag af gl. IT Kristensen/DCA beregning samt nyere opgørelse). Gennemsnit for de to kort (men ikke nødvendigvis for hele DK) er hhv. 0,76 og 0,80 DE pr. ha.



Figur 7. Husdyrtæthed pga. af gl. IT Kristensen beregning (DE) samt nyere opgørelse (DeNy)

### Kvælstofnormer og skyggepris på kvælstof

De nærværende kvælstofkvoter, der svarer til 85-90 pct. af den økonomisk optimale kvælstoftildeling, er udledt på grundlag af udbyttefunktioner (anden- og tredjegradspolynomier) for hvert eneste forsøg, de seneste 10 år, men der er ikke beregnet samlede, resulterende eksplicitte udbyttefunktioner for periodens forsøg. Sådanne udbyttefunktioner er imidlertid en forudsætning for at kunne beregne de driftsøkonomiske effekter af en ændret kvælstofregulering. Afgrøderne har meget forskellige produktpriser og udbyttefunktioner (kvælstofresponsfunktioner). Omkostningerne ved en given, absolut reduktion i kvælstoftildelingen kan derfor variere væsentligt fra afgrøde til afgrøde. De hidtidige kvælstofkvoter (input) har haft til formål at reducere kvælstofudvaskningen. Det er formentlig af praktiske årsager, dels mangel på eksplicitte udbyttefunktioner, dels manglende muligheder for at kontrollere, om kvoterne for de enkelte afgrøder omfordes på bedriften, at kvoterne oprindeligt er fastsat som 90 pct. (og senere 85 pct.) af den økonomisk optimale tildeling.

Når en given, begrænset, mængde kvælstof skal fordeles driftsøkonomisk optimalt mellem afgrøderne gælder det, at kvælstof, ved den optimale tildeling, vil/bør have den samme marginalværdi i alle afgrøderne. Når den økonomisk rationelle landmand alligevel (ønsket eller uønsket) omfordeler kvoterne driftsøkonomisk optimalt mellem alle bedriftens afgrøder, er det derfor produktionsøkonomisk korrekt, at

benytte en skyggepris (afgift) på kvælstof ved beregning af kvoten, frem for at beregne kvoten som fx en 85 pct. reduktion i den økonomisk optimale tildeling. Afgiften sættes så til det niveau, der giver den ønskede kvote.

Ved optimering og regulering af driftsøkonomi og kvælstofudvaskning er det en stor fordel, at kvælstofinput er beregnet med en og samme skyggepris på kvælstof for alle afgrøder og bedrifter. Det svarer til en situation, hvor kvoterne er frit omsættelige, eller der ikke er ønske om/ikke er mulighed for at forhindre kvælstofhandel mellem bedrifterne. Det fjerner ligeledes incitamentet til at forpagte (inferiør) jord eller dyrke (inferiøre) afgrøder, med henblik på at udnytte kvoten fra disse marker og afgrøder til andre marker og afgrøder. Med kvoter baseret på en skyggepris på kvælstof er det således muligt at beregne en pålidelig, driftsøkonomisk optimal kvælstofanvendelse og udvaskning ved en given skyggepris på kvælstof. I princippet kan den samlede kvote, beregnet med skyggepriser, uddeles og handles efter mange forskellige principper. Ved at tildele afgrøderne en kvote, der er beregnet på grundlag af én fælles skyggepris på kvælstof, er der, som med det nuværende kvotesystem, ikke behov for en illegal eller administrativ tung og bekostelig (risiko og transaktionsomkostninger) handel med kvælstof og kvoter mellem bedrifterne.

#### **Fastsættelse af reference- og basiskvoter**

Til de aktuelle analyser er det dels nødvendigt og muligt at anvende eksplicitte udbyttefunktioner, dels administrativt og modelteknisk ønskeligt at regulere kvælstoftildelingen ved hjælp af en skyggepris på kvælstof. I udkast til fremtidig kvælstofregulering opererer NAER med en såkaldt basis-kvælstof-kvote. I nærværende analyser antages det, at disse basiskvoter fastsættes ved hjælp af eksplicitte skyggepriser på kvælstof. Er der behov for forskellige basiskvoter for forskellige vandoplande, vil det derfor resultere i forskellige skyggepriser på kvælstof for de enkelte vandoplande. Forskellen i skyggepris vil samtidigt indikere størrelsen af det økonomiske incitament til (uønsket) handel med kvælstof og kvælstofkvote på tværs af vandoplande.

De i analyserne benyttede udbyttefunktioner (andengradspolynomier) er estimeret og konstrueret så de bedst muligt udtrykker/svarer til de gældende kvælstofnormer, relevante landsforsøg, bonitetsforskelle mv. På trods heraf er det ikke muligt med det nuværende modelapparat, at beregne kvælstofforbrug, udbytter og udvaskning (præcist) for de enkelte afgrøder og marker, som ved den nuværende kvælstofregulering. Referencen er i stedet kvælstofforbrug, udbytter og en udvaskning for de enkelte afgrøder og marker bestemt med én fælles skyggepris for hele landet, der svarer til det nuværende samlede kvælstofforbrug eller -udvaskning.

#### **Kvælstofudvaskning**

Kvælstofudvaskning fra rodzonen beregnes med N-LES4 modellen (Kristensen et al., 2008). Ved beregning af udvaskningen fra en given afgrøde et givet år, indgår plantedække forår/sommer før, efteråret før, samme forår/sommer og samme efterår, samt kvælstoftildeling efteråret før og samme forår/sommer.

Også perkulation og nedbør (geofysiske/geografiske forhold i rodzonen, jordtype, nedbør, landsdel) er væsentlige parametre i beregningerne. Perkulationen varierer fra mark til mark, men i de aktuelle analyser, er det valgt at antage ensartede (beregne gennemsnitlige) geofysiske/geografiske forhold for hhv. sandjord

og lerjord for hver enkelt af de godt 600 10 x 10 km klimagrid celler, der tilsammen dækker det danske landbrugsareal. Kvælstofudvaskning fra rodzonen  $L$  [kg N pr. ha] er herefter (Børgesen, 2014) beregnet med N-LES4 modellen for en lang række sædskifter, på henholdsvis lerjord og sandjord, med tyve års klimadata, for hver enkelt af de godt 600 klimagrid celler. På basis af disse modelberegninger kan udvaskningen fra rodzonen (for i første omgang monokulturer) beregnes med følgende, stærkt reducerede model:

$$L = (T + \max(0; g + s + kx)^{1,5})/G$$

$T$  er en trendparameter, fælles for alle sædskifter, jordtyper og landsdele,  $g$  er en jordtypebestemt parameter (c/n forhold mv.),  $s$  er en sædskiftespecifik parameter, der beregnes som anført i Kristensen et al. (2008, tabel 2, side 8),  $x$  er kvælstofinput [kg N pr. ha] og  $G$  er en perkulationsfaktor (nedbør, geofysiske forhold i rodzonen, dybde, ler, humus, tekstur mv.), mens  $k$  er en simpel, konstant omregningsfaktor. Det har uden væsentlige tab af præcision været muligt at fastsætte  $T$  til 215 og  $k$  til 0,2 mens  $g$  og  $G$  værdier er estimeret for hvert enkelt klimagrid celle og jordtype (sand og ler), så den med N-LES4 modellen beregnede udvaskning for de forskellige sædskifter (her monokulturer) forklares bedst muligt (med mindste kvadrats metode).

$$L = (215 + \max(0; g + s + 0,2x)^{1,5})/G$$

**Tabel 3.** Variationen i de estimerede  $G$ - og  $g$ -værdier

	G		g	
	Sand	Ler	Sand	Ler
Gennemsnit	11,7	15,1	63,6	64,1
Standardafvigelse	2,5	3,1	2,1	2,0
Minimum	8,2	10,6	56,6	60,7
Maksimum	19,4	26,3	76,5	77,5

Den sædskiftespecifikke parameter  $s$  kan som nævnt beregnes med Kristensen et al. (2008, tabel 2, side 8). Det gælder, at et sædskifte med vårsæd efter vårsæd uden efterafgrøder (reference sædskifte) har en  $s$  værdi på 0.

**Tabel 4.**  $s$ -værdier for udvalgte monokulturer

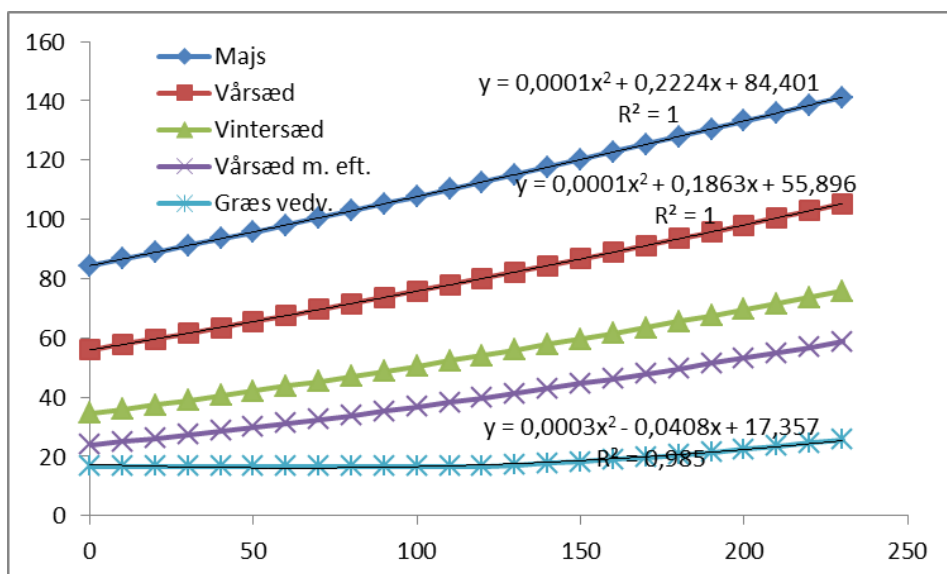
Sædskifte	$s$ -værdi
Kun majs (uden udlæg og efterafgrøder)	28
Kun vårsæd (uden efterafgrøder)	0
Kun vintersæd	-26
Vårsæd med efterafgrøder	-43
Vedvarende græs	-86

Modelberegnet kvælstofudvaskning fra vårsæd efter vårsæd med og uden efterafgrøde med gennemsnitlige  $G$  og  $g$  værdier ( $G=13$  og  $g=64$ ) fremgår af tabel 5 og figur 8.



**Tabel 5.** Modelberegnet udvaskning fra rodzonen (kg N pr. ha) ved forskellige niveauer af kvælstoftildeling (0-250 kg N pr. ha)

$x$	Majs	Vårsæd	Vintersæd	Vårsæd m. eft.	Græs vedv.
0	84,4	55,9	34,6	23,9	16,6
25	90,0	60,6	38,2	26,7	16,6
50	95,8	65,5	42,1	29,8	16,6
75	101,7	70,6	46,2	33,2	16,6
100	107,7	75,8	50,5	36,7	16,6
150	120,2	86,6	59,7	44,6	18,3
200	133,2	98,1	69,5	53,2	22,4
250	146,7	110,2	80,0	62,6	27,9



**Figur 8.** Modelberegnet kvælstofudvaskning (kg N pr. ha) som funktion af kvælstoftildeling (kg N pr. ha)

Den marginale kvælstofudvaskning  $dL/dx$  kan beregnes med følgende formel:

$$\frac{dL}{dx} = 1,5 \times 0,2 / G \sqrt{\max(0; g + s + 0,2x)}$$

**Tabel 6.** Modelberegnet marginaludvaskning fra rodzonen (kg N pr. kg tildelt N) ved forskellige niveauer for tildeling af kvælstof (0-250 kg N pr. ha) ved gennemsnitlig perkulation

$x$	Majs	Vårsæd	Vintersæd	Vårsæd m. eft.	Græs vedv.
	<i>Pct.</i>	<i>Pct.</i>	<i>Pct.</i>	<i>Pct.</i>	<i>Pct.</i>
0	22,1	18,5	14,2	10,6	2,3
25	22,7	19,2	15,1	11,8	2,3
50	23,3	19,9	16,0	12,8	2,3
75	23,9	20,5	16,8	13,8	2,3
100	24,4	21,2	17,6	14,8	2,3
150	25,5	22,4	19,0	16,5	6,5
200	26,5	23,5	20,4	18,0	9,8
250	27,5	24,6	21,6	19,4	12,2

Tabel 7 viser modelberegnet kvælstofudvaskning fra rodzonen ved varierende jordtype og perkulation. Det fremgår af tabellen, at perkulationsforhold har overordentlig stor indflydelse på variationen i udvaskningen af mindst samme størrelsesorden som variationen i retentionen. Bemærk også, at efterafgrøderne, i dette eksempel, i alle tilfælde halverer udvaskningen, mens der er stor variation i marginaludvaskningen. Generelt har variationen i  $G$ -værdierne større indflydelse på udvaskningen end variationen i  $g$ -værdierne. Variationen i perkulation (jordtype og nedbør) har med andre ord større betydning for udvaskningen fra rodzonen end variationen i  $c/n$  og bonitets forhold.

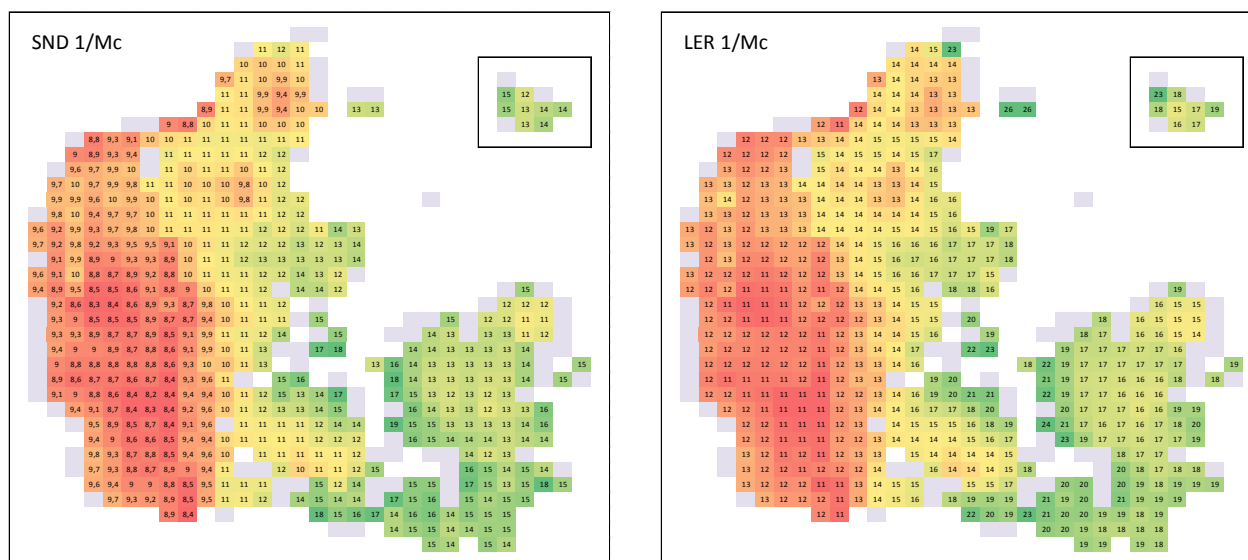
**Tabel 7.** Absolut (kg N pr. ha) og relativ (kg N pr. kg N) kvælstofudvaskning fra rodzonen for vårsæd m/u efterafgrøde ved tildeling af 120 kg N pr. ha ved varierende bonitet og perkulation ( $g=60-75$ ,  $G=9-25$ )

$g$ :	60	65	70	75	60	65	70	75
$G$ (perk.)	Vårsæd uden efterafgrøde (kg N pr. ha)				Vårsæd med efterafgrøde (kg N pr. ha)			
9	109,4	117,2	125,2	133,3	52,0	57,4	63,2	69,2
13	75,8	81,1	86,6	92,3	36,0	39,8	43,7	47,9
17	57,9	62,0	66,3	70,6	27,5	30,4	33,4	36,6
21	46,9	50,2	53,6	57,1	22,3	24,6	27,1	29,7
25	39,4	42,2	45,1	48,0	18,7	20,7	22,7	24,9
	<i>Marginaludvaskning u. efterafgrøde (pct.)</i>				<i>Marginaludvaskning m. efterafgrøde (pct.)</i>			
9	47,6	48,2	48,8	49,3	21,1	22,4	23,6	24,7
13	33,0	33,4	33,8	34,2	14,6	15,5	16,3	17,1
17	25,2	25,5	25,8	26,1	11,2	11,8	12,5	13,1
21	20,4	20,7	20,9	21,1	9,0	9,6	10,1	10,6
25	17,1	17,3	17,6	17,8	7,6	8,0	8,5	8,9

Ovenstående eksempler viser, at effekten af et virkemiddel som fx efterafgrøder eller ændringer i sædskiftet i meget høj grad afhænger af niveauet for tildeling af kvælstof, sædskiftet og perkulationen. Dette kommer også til udtryk ved en meget stor variation i marginaludvaskningen. Dette indikerer, at det vil være en meget grov forenkling at antage, en ensartet marginaludvaskning fra rodzonen for hele landet på fx 30 pct. En sådan forenkling vil medføre at virkemidler placeres uden hensyn til den meget store forskel i perkulation såvel mellem som indenfor vandoplande. Der er derfor valgt i denne model, at effekten af nye og gamle dyrkningstekniske virkemidler skal beskrives med en og kun én  $s$ -værdi. Herved sikres det, at effekten af virkemidlet beregnes med korrekt hensyntagen til den aktuelle jordtype, perkulation og retention.

#### Variation i $G$ (perkulations) værdier

Figur 9 viser variationen i  $G$ -værdier (perkulation) estimeret på grundlag af N-LES4 modelberegninger (Børgesen 2014) for en 20-årig periode med udvalgte sædskifter (primært monokulturer) i 10x10 km klimagrid celler. Figuren viser klimagridkort med estimerede  $G$ -værdier ( $1/Mc$ ) for hhv. sandjord og lerjord.

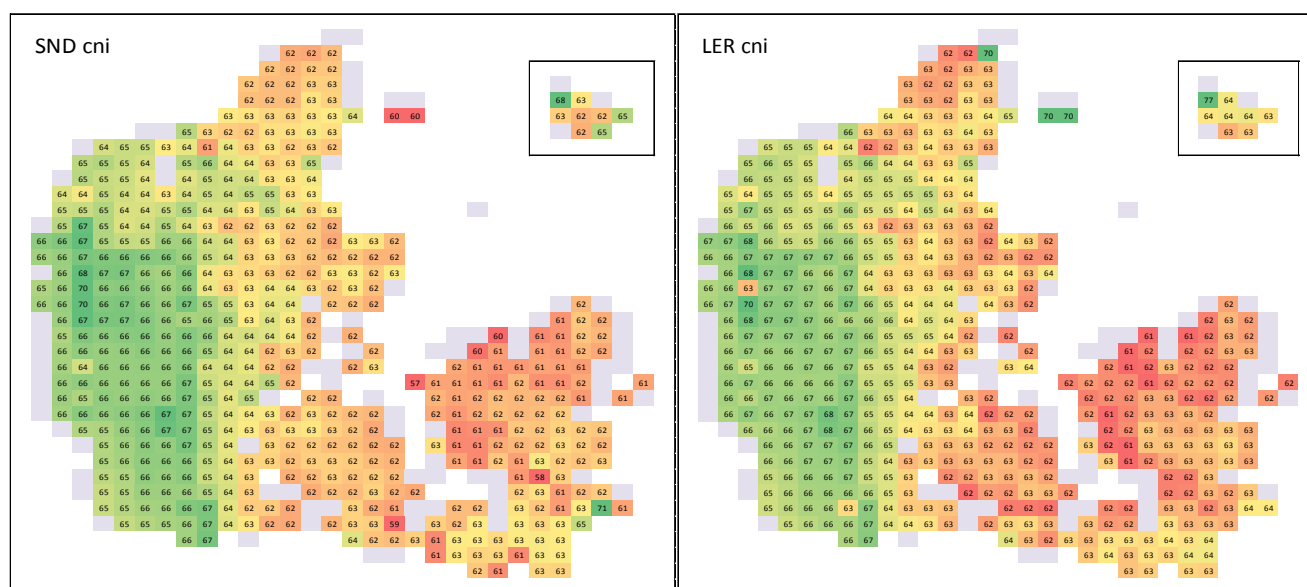


**Figur 9.** Estimerede, gennemsnitlige *G*-værdier, dvs. perkulations- og nedbørs værdier, for hhv. sandjord (SND) og lerjord (LER) i godt 600 10 km x 10 km grid-celler. Celler med mindre end 1.000 ha dyrket jord er markeret med grå.

Celler med mindre end 1.000 ha dyrket jord er markeret med grå. Bemærk, at der benyttet forskellig farvemarkering i de to figurer. *G*-værdier er i gns. 30 pct. højere for lerjord (14,7) end for sandjord (11,3). En høj *G* værdi medfører en lavere udvaskning fra rodzonen.

### Variation i *g* (c/n-forhold mv.) værdier

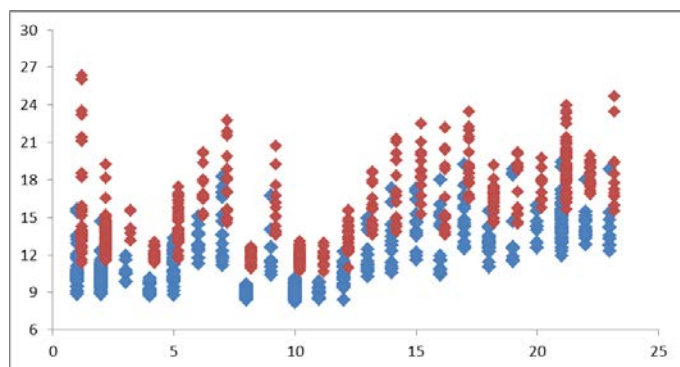
Figur 10 viser variationen i *g*-værdier (c/n forhold mv.), estimeret på grundlag af N-LES4 modelberegninger for en 20-årig periode med udvalgte sædskeer (primært monokulturer) i 10x10 km klimagridceller. Det gælder, at der ikke er den store forskel på de gennemsnit/niveauet for *g*-værdier. En høj *g* værdi medfører en højere udvaskning fra rodzonen.



**Figur 10.** Estimerede, gennemsnitlige *g*-værdier (c/n forhold mv.) for hhv. sandjord og lerjord i godt 600 10 km x 10 km grid-celler. Celler med mindre end 1.000 ha dyrket jord er markeret med grå.

### Variation i $G$ -værdier i vandoplande

Variationen i perkulationen, der udtrykkes ved  $G$ -værdien, har som nævnt lige så stor betydning for udvaskningen til vandoplandet som retentionen.  $G$ -værdierne er i nærværende analyser bestemt for klimagrid celler. Figur 11 viser variationen i  $G$ -værdien for de 23 vandoplande for hhv. sandjord og lerjord.



**Figur 11.** Variationen i  $G$ -værdien (y-aksen) for de 23 vandoplande (x-aksen) for hhv. sandjord (blå) og lerjord (rød)

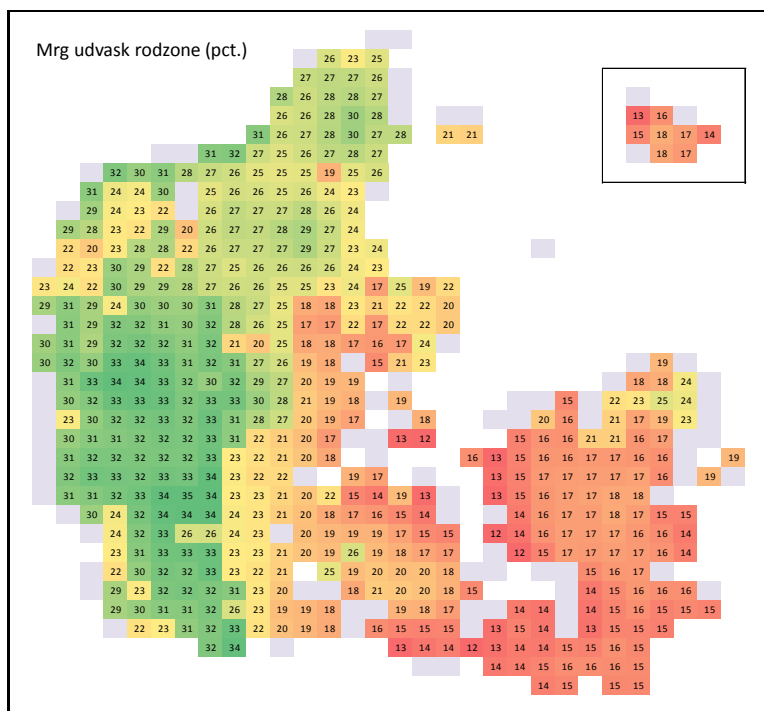
I mange vandoplande er der op imod en faktor 2 til forskel på udvaskningen ved højeste og laveste  $G$ -værdi for hhv. lerjord og sandjord, og i alle vandoplande er der en væsentlig, men varierende forskel på udvaskningen mellem de to jordtyper. Ved placering af virkemidler og design af incitamenter er det derfor vigtigt, at den aktuelle perkulation og jordtype ( $G$ -værdierne) indgår med samme vægt (som multiplikator, samme sted i regnestykket) som retentionen.

### Variation i marginal kvælstofudvaskning fra rodzonen

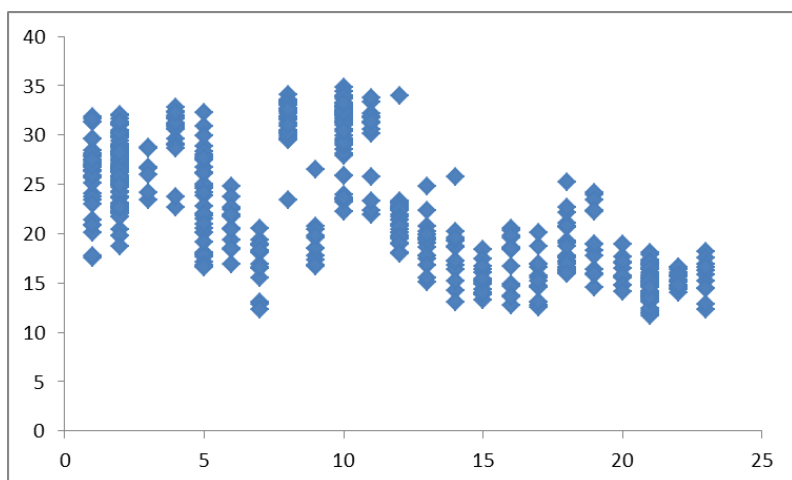
Figur 12 viser variation i marginaludvaskning (pct.) fra rodzonen beregnet for vårbyg dyrket uden efterafgrøde ved tildeling af 120 kg N pr. ha på den i klimagrid cellen fremherskende jordtype.

Figur 13 viser variation i marginaludvaskning (pct.) fra rodzonen for 23 vandoplande beregnet for vårbyg dyrket uden efterafgrøde ved tildeling af 120 kg N pr. ha på de fremherskende jordtyper i hvert vandopland.

Den store variation i den beregnede marginaludvaskning skyldes alene variationen i  $g$  og især  $G$ -værdierne. Dette indikerer, som tidligere nævnt, at der ved beregning af incitamenter og placering af virkemidler skal tages hensyn til disse forskelle, med mindst samme alvor, som der tages hensyn til retentionen.



**Figur 12.** Variation i marginaludvaskning (pct.) fra rodzonen beregnet for vårbyg dyrket uden efterafgrøde ved tildeling af 120 kg N pr. ha på den i klimagrid cellen fremherskende jordtype.



**Figur 13.** Variation i marginaludvaskning (pct.) fra rodzonen for 23 vandoplande beregnet for vårbyg dyrket uden efterafgrøde ved tildeling af 120 kg N pr. ha på de fremherskende jordtyper.

### Syntetiske *s*-værdier

For alle mulige, også langt mere komplekse sædskifter, er det muligt med Kristensen et al. (2008, tabel 2, side 8) at beregne specifikke, entydige *s*-værdier, der uanset kvælstoftildeling, jordtype og landsdel kan benyttes ved beregning af kvælstofudvaskningen fra rodzonen for det pågældende sædskifte.

For nye virkemidler, hvor effekten kun er kendt ved en given kvælstoftildeling  $x$  i et givet sædskifte, kan der bestemmes en såkaldt syntetisk *s*-værdi med følgende formler,

$$s_1 = \frac{(L_1 \times G)^{\frac{1}{1,5}} - g - 0,2 \times}{0,2}, \quad s_2 = \frac{(L_2 \times G)^{\frac{1}{1,5}} - g - 0,2 \times}{0,2} \quad \text{og} \quad \Delta s = s_2 - s_1$$

Hvor  $L_1$  og  $L_2$  er udvaskning fra rodzonen med og uden nyt virkemiddel,  $s_1$  er  $s$ -værdi for sædskiftet uden virkemiddel,  $s_2$  er  $s$ -værdi med virkemiddel og  $\Delta s$  er den syntetiske  $s$ -værdi for det nye virkemiddel. Der er i princippet frit for, om det fx er tidlig sået vintersæd, der skal opfattes som en selvstændig, ny afgrøde med egen  $s$ -værdi ( $s_2$ ), eller det er "tidlig sået", der skal tildeles en egen  $s$ -værdi ( $\Delta s$ ), der efterfølgende kan adderes til vintersæd ( $s_1$ ). I mangel af bedre, kan der benyttes gennemsnitlige  $g$  og  $G$  værdier ved beregningerne.

Ikke alle virkemidler kan beskrives og beregnes med  $s$ -værdier. Minivådområder har ingen effekt på udbytte og udvaskning fra rodzonen, men øger alene retentionen fra et givet område (hele eller dele af markblokke). Det giver derfor ikke mening, at beregne  $s$ -værdier for minivådområder. Her er det interessant at vide, hvor meget retentionen øges for hvilke arealer. Minivådområdet, giver så at sige anledning til, at opdatere retentionskortet. Der placeres ikke minivådområder i de aktuelle analyser, men den miljøøkonomiske værdi af "en ændring af retentionskortet" for en given markblok og afgrøde samt en given marginal reduktionsomkostning for det pågældende vandopland vil kunne beregnes (og fx vises på et kort).

#### **Udvaskning og $s$ -værdier for hele, mere komplicerede sædskifter**

N-LES4 modellen beregner som nævnt udvaskning fra rodzonen for den enkelte afgrøde. Til beregning af udvaskningen fra et helt sædskifte er det, lige som for nye virkemidler, muligt at beregne syntetiske  $s$ -værdier for hele sædskiftet forudsat, at kvælstof fordeles mellem afgrøderne efter faste regler, hvilket er tilfældet, når det fx antages at den samlede kvælstofkvote for sædskiftet fordeles driftsøkonomisk rationelt mellem afgrøderne.

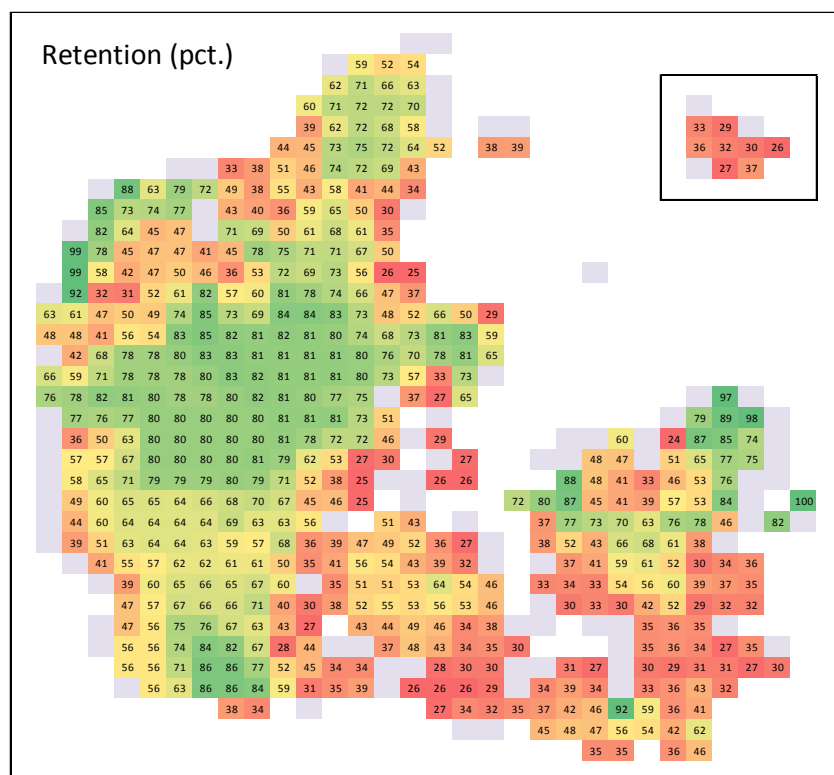
#### **Variation i kvælstofretention**

Ved beregning af kvælstofudledningen til vandmiljøet spiller retentionen, som allerede nævnt, en stor rolle. Retentionen udtrykker, hvor stor en andel (pct.) af det kvælstof, der udvaskes fra rodzonen, som rent faktisk når det kystnære vandmiljø. Der er store regionale og lokale forskelle i retentionen.

I de aktuelle analyser, er benyttet et retentionskort baseret på Blicher-Mathisen et al. (2007), men udmøntet på markblokke (Inge T. Kristensen). De aktuelle analyser er, som nævnt, baseret på gennemsnitlige  $G$  og  $g$ -værdier for de enkelte klimagrid celler. Anvendelsen af gennemsnitlige  $G$ -værdier for klimagrid celler for hhv. lerjord og sandjord er (jf. Blicher-Mathisen, pers. kom.) ikke en urimelig antagelse. Perkulationen ( $G$ -værdierne) er bestemt af nedbør og geofysiske forhold i rodzonen, der ikke ændres væsentligt over en afstand på 10 km, men kan variere væsentligt over større afstande og indenfor vandoplande. Kun/især for celler og bedrifter på grænsen mellem de fem georegioner kan der forventes en væsentlig variation i perkulationen over kortere afstande.

Retentionen kan variere væsentligt og over meget korte afstande. Retentionen er bl.a. bestemt af lokale vandskel og dræning og kan derfor variere væsentligt, også fra mark til mark. En række af de efterfølgende analyser og figurer er baseret på gennemsnitlig retention for de enkelte klimagridceller, mens de endelige analyser er baseret på afrundede/kategoriserede retentionsværdier pr. markblokke. Det skal bemærkes, at

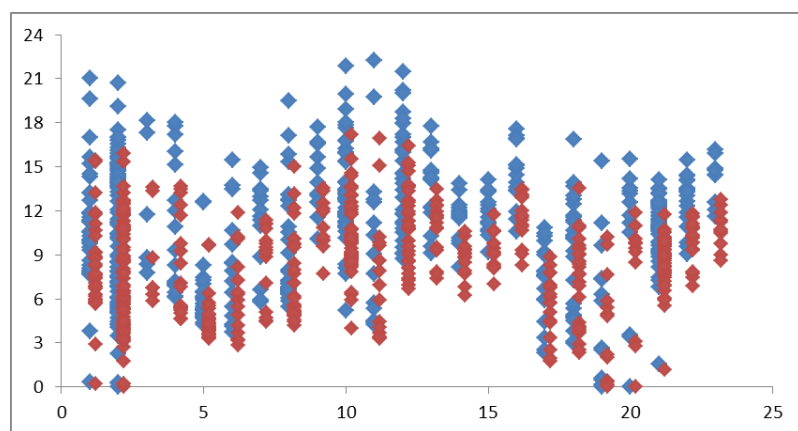
der foråret 2015 er udgivet et nyt retentionskort, som af gode grunde ikke indgår i nærværende analyser gennemført i 2014.



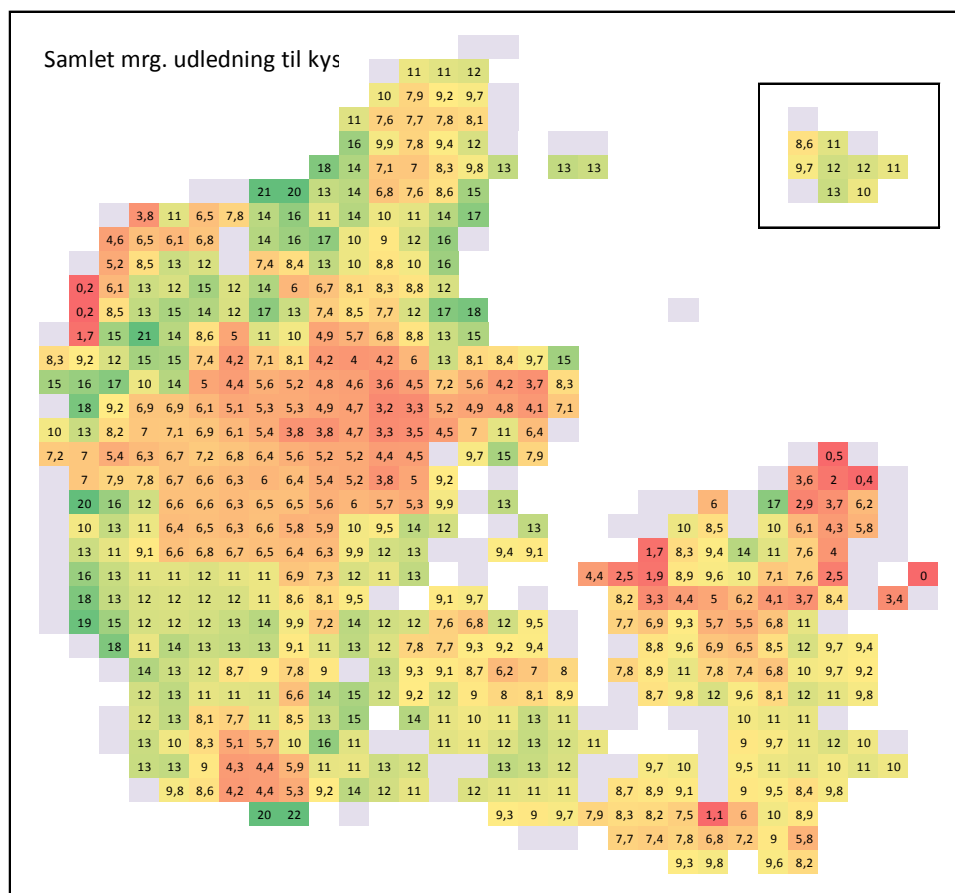
**Figur 14.** Kvælstofretention (10x10 km klimagrid) baseret på IT Kristensen (markblokke) på grundlag af Blicher-Mathisen et al. (2007). Celler med mindre end 1.000 ha dyrket jord er markeret med grå.

### Kombineret effekt af perkulation, jordtype og retention

Ved beregning af den endelige udledning fra afgrøden til kysten indgår såvel perkulation og jordtype som retention. Figur 15 viser variationen i marginaludledningen til kysten fra vårbyg ved tildeling af 120 kg N pr. ha for de 23 vandoplande for hhv. sandjord og lerjord. Det fremgår af figuren, at der inden for alle vandoplande er en væsentlig variation i den endelige marginale udvaskning.



**Figur 15.** Variationen i marginaludledningen til kysten fra vårbyg ved tildeling af 120 kg N pr. ha for de 23 vandoplande for hhv. sandjord (blå) og lerjord (rød)

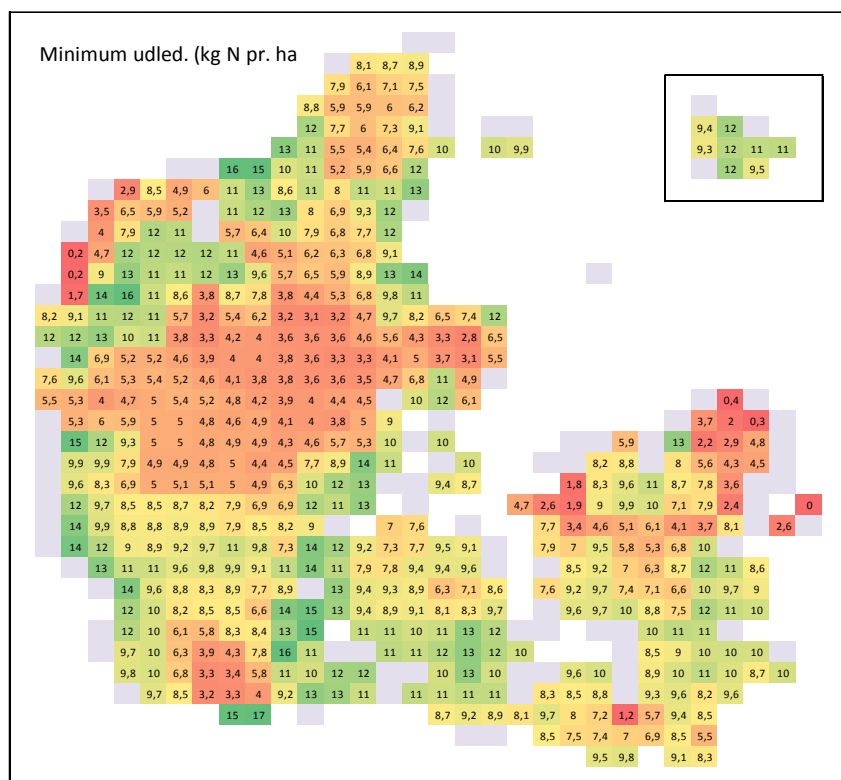


**Figur 16.** Marginal kvælstofudledning til kysten fra vårbyg ved tildeling af 120 kg N pr. ha for den i klimagrid cellen fremherskende jordtype. Celler med mindre end 1.000 ha dyrket jord er markeret med grå.

### Mindst mulige, modelberegnete udledning

Figur 17 viser den mindst mulige beregnede udvaskning (kg N pr. ha) til vandmiljøet, med den valgte N-LES4 opsætning. Der er tale om udtagning med fx permanent græs og ingen gødskningstildeling. Det fremgår af figuren, at der i områder med lav retention og høj perkulation, dvs. områder hvor udtagning er særlig aktuell, desværre også er grænser for, hvor meget udledningen kan reduceres. Der er ingen tvivl om, at virkemidler især skal placeres i disse områder, men også vigtigt at erkende, at den modelberegnete udvaskning fra disse områder, selv med de skrappeste virkemidler, i mange tilfælde vil ligge på linje med eller over målsætningen for de pågældende vandoplande. Bemærk, at det er trendparameteren ( $T=215$ ), der bestemmer niveauet, ikke kun den mindst mulige udvaskning, men udvaskningen generelt.





**Figur 17.** Den mindst mulige beregnede udvaskning (kg N pr. ha) til vandmiljøet, med de estimerede, syntetiske N-LES4 parametre

### Omkostningseffektivitet

Ved en miljøøkonomisk optimal regulering er de marginale omkostninger til reduktion af kvælstofudledningen til recipienten internaliseret i landmandens optimering af areal- og kvælstofanvendelse. En sådan internalisering kan fx sikres med afgifter på udledningen til vanoplandet svarende til de marginale reduktionsomkostninger. Da der er stor variation i de marginale reduktionsomkostninger for de 23 danske hovedvandoplande, er der tilsvarende stor variation i de afgifter, der skal indregnes ved en miljøøkonomisk optimal kvælstof- og arealanvendelse i de 23 vandoplande.

Det fremgår af figur 8, at udvaskningen fra rodzonen som funktion af kvælstoftildeling uden tab af præcision ( $R^2 \sim 100$  pct.) kan beskrives ved et andengradspolynomium. I det følgende er såvel udbytte ( $abc$  parametre) som udvaskning ( $ABC$  parametre) beskrevet ved andengradspolynomier,  $x$  er kvælstoftildeling,  $p$  er produktpris,  $w$  og  $\lambda$  er pris og eventuel afgift på kvælstof,  $q$  er afgift på udledning til vandoplandet,  $R$  er retention,  $G$  er perkulationsfaktor og  $P$  er "flat rate" tilbageført afgiftsprovenu. Bemærk, at  $G$ -værdi er trukket ud af udvaskning fra rodzonen og optræder som en selvstændig parameter. Profitfunktion for en given afgrøde er herefter:

$$\pi = p(ax^2 + bx + c) - wx - \lambda x - q(Ax^2 + Bx + C)(1 - R)/G - P$$

Miljøøkonomisk optimal kvælstoftildeling  $x_{me}^*$  kan beregnes således:

$$\begin{aligned}\text{Førsteordens betingelse: } \quad & \frac{d\pi}{dx} = 0 \\ \Leftrightarrow \quad & p(2ax + b) - w - \lambda - q(2Ax + B)(1 - R)/G = 0 \\ \Leftrightarrow \quad & x_{me}^* = \frac{-pb + w + \lambda + qB(1-R)/G}{p2a - q2A(1-R)/G}\end{aligned}$$

Bemærk, at den miljøøkonomisk optimale tildeling ikke påvirkes af en eventuel flat rate tilbageføring af afgiftsprovenuet, da denne ikke afhænger af det aktuelle afgrødevalg eller gødningstildeling.

Ved høj retention ( $R=1$ ) (eller ingen afgift på kvælstofudledning) svarer den miljøøkonomisk optimale kvælstoftildeling  $x_{me}^*$  til den driftsøkonomisk optimale kvælstoftildeling  $x_{pe}^*$ :

$$x_{pe}^* = \frac{-pb + w + \lambda}{p2a}$$

Ved hjælp af disse formler er det muligt at udlede dækningsbidrag, kvælstofudledning og afgiftsprovenu ved hhv. en miljøøkonomisk og en driftsøkonomisk optimal kvælstofanvendelse med og uden brug af afgift (basiskvote) på kvælstof og uden hensyn til størrelsen af en eventuel flat rate tilbageføring af afgiftsprovenuet på kvælstof og udledning.

Bemærk, at en eventuel eftervirkning fra husdyrgødning ( $D$  ikke vist) vil være inkluderet i hhv.  $c$  og  $C$  parametrene, når udbytte og udvaskning mv., som i ovenstående eksempel, beregnes på grundlag af andengradspolynomier.

## Referencer

- Blicher-Mathisen et al. (2007). Kvælstofreduktionen fra rodzonen til kyst for Danmark. Faglig rapport fra DMU nr. 616.
- Blicher-Mathiesen G, Rolighed J og Ørum JE (2015). Notat om vurdering af miljø og økonomi for bedrifter i pilotprojektet for ny arealanvendelse. Bilag 10 til Pilotprojektet, Miljøstyrelsen 2015.  
[http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/01/978-87-93283-51-0\\_bilag.pdf](http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/01/978-87-93283-51-0_bilag.pdf)
- Eriksen Jørgen, Poul Nordemann Jensen og Brian H. Jacobsen (eds.)(2014). Virkemidler til Realisering af 2. Generations Vandplaner og Måltrettet Arealregulering. DCA Rapport nr. 052, december 2014.  
[http://naturstyrelsen.dk/media/132088/virkemiddelkatalog\\_web-d-16012015.pdf](http://naturstyrelsen.dk/media/132088/virkemiddelkatalog_web-d-16012015.pdf)
- Jacobsen B.H. (2015). Gennemgang af GSA-virkemiddelmodellen i relation til den fremtidige kvælstofregulering. IFRO Udredning 2015/32.  
[http://curis.ku.dk/ws/files/143281258/IFRO\\_Udredning\\_2015\\_32.pdf](http://curis.ku.dk/ws/files/143281258/IFRO_Udredning_2015_32.pdf)
- Kristensen et al. (2008). Reestimation and further development in the model N-LES, N-LES3 to N-LES4. DJF Plant Science no. 139. December 2008
- Miljøstyrelsen (2015). Pilotprojekt for ny måltrettet arealregulering - Afprøvning af prototyper for kvælstofreguleringsmodeller. <http://mst.dk/media/130365/pilotprojekt-for-ny-maalrettet-arealregulering.pdf>
- SEGES (2014). Kalkule Mark. [https://www.landbrugsinfo.dk/Itvaerktoejer/Planteavl/Sider/kalkule-mark-version-1-06\\_pl\\_13\\_1177.aspx](https://www.landbrugsinfo.dk/Itvaerktoejer/Planteavl/Sider/kalkule-mark-version-1-06_pl_13_1177.aspx)
- VFL (2014a). Datagrundlag for økonomiske beregninger i Pilotprojektet. Bilag 9 til Pilotprojektet, Miljøstyrelsen 2015. [http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/01/978-87-93283-51-0\\_bilag.pdf](http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/01/978-87-93283-51-0_bilag.pdf)
- VFL (2014b). Håndbog til Driftsplanlægning. Landbrugsforlaget.
- Ørum J.E., Schou J.S. (2015). Driftsøkonomiske konsekvenser af reduceret kvælstofgødskning på udvalgte landbrugsbedrifter. IFRO Udredning 2015/34.  
[http://curis.ku.dk/ws/files/145201898/IFRO\\_Udredning\\_2015\\_34.pdf](http://curis.ku.dk/ws/files/145201898/IFRO_Udredning_2015_34.pdf)

## Bilag:

Detaljerede (rå) resultater for de 23 vandoplande (se s. 7) ligger i et regneark, der kan hentes her:  
[http://curis.ku.dk/admin/files/148684862/LogfilModelk\\_rslr\\_a1.xlsx](http://curis.ku.dk/admin/files/148684862/LogfilModelk_rslr_a1.xlsx)

## Bilag

**Tabel B1.** Gennemsnitlige  $G$  og  $g$ -værdier for 23 vandoplande, hvor  $G$ -værdi udtrykker perkulation mv. ( $1/Mc$ ) og  $g$ -værdi udtrykker betydning af C/N forhold mv.

iVop	Vandopland	SND 1/Mc	LER 1/Mc	SND cni	LER cni
1	1.1. Nordlige Kattegat	10,9	15,3	62,4	63,7
2	1.2 Limfjorden	10,3	13,4	64,3	64,8
3	1.3 Mariager Fjord	10,7	14,2	63,6	64,0
4	1.4 Nisum Fjord	9,3	12,1	66,4	66,5
5	1.5 Randes Fjord	11,0	14,5	63,4	63,9
6	1.6 Djursland	13,1	17,3	62,3	62,7
7	1.7 Århus Bugt	14,1	17,9	62,8	63,3
8	1.8 Ringkøbing Fjord	9,0	11,8	66,0	66,5
9	1.9 Horsens Fjord	12,7	16,0	62,6	63,1
10	1.10 Vadehavet	9,0	11,7	65,7	66,3
11	4.0 Kruså	9,1	11,8	65,6	65,9
12	1.11 Lillebælt-Jylland	10,2	13,2	63,7	64,2
13	1.12 Lillebælt – Fyn	12,1	15,6	62,3	62,8
14	1.13 Odense Fjord	12,8	16,9	62,3	62,6
15	1.14 Storebælt	14,8	18,7	61,7	62,3
16	1.15 Sydfynske	13,2	16,6	62,3	62,6
17	2.1. Kalundborg	14,8	19,2	61,3	62,1
18	2.2 Isefjord og Roskilde Fjord	13,0	16,5	61,4	61,9
19	2.3 Øresund	14,0	17,3	64,9	62,4
20	2.4 Køge Bugt	13,9	17,7	62,2	62,7
21	2.5 Smålands-farvandet	15,0	19,1	62,2	62,6
22	2.6 Østersøen	14,3	18,2	62,6	63,0
23	3.0 Bornholm	14,2	18,7	64,8	66,0

De viste  $g$  og  $G$  værdier er gennemsnitsværdier for de 23 vandoplande, beregnet på grundlag af  $g$  og  $G$  værdier estimeret for de godt 600 10 km x 10 km grid-celler, der benyttes i de miljøøkonomiske modelberegninger. Det er således ikke de viste gennemsnitsværdier, der benyttes i modelberegningerne.

### Afgrøder og sædskifter

Modellen er baseret på i alt 16 sædskifter, der er karakteriseret ved en række afgrøder (tabel B1), der dyrkes i en fast rækkefølge (tabel B3). Disse sædskifter kan ikke justeres, men en del af sædskifterne kan konverteres til andre sædskifter. Basis sædskifterne baseres på bedriftenes gennemsnitlige arealanvendelse jf. GLR 2009-2011. Der kan ikke ved konvertering dyrkes mere frøgræs, kartofler, sukkerroer, majs og kløvergræs, men kun dyrkes mere vårsæd og flere efterafgrøder. Det er således kun bedrifter, der allerede dyrker frøgræs, der får lov at dyrke frøgræs i modellen og sædskiftet med frøgræs kan ikke øges, kun mindskes.

**Tabel B2.** Afgrødekoder

Kode	Beskrivelse
vase/vasa	Vårsæd m/u efterafgrøde
vise/visa	Vintersæd m/u efterafgrøde
sroe	Fabriksroer
frøg	Frøgræs
kart	Kartofler
raps	Vinterraps
majs	Majshelsæd
klgr	Kløvergræs
vvgr	Vedvarende græs

For hvert sædskifte er der parametre, der 1) beskriver andelen af efterafgrøder (efta), 2) beskriver andelen af vintersæd (visa), 3) beskriver, hvor meget kvælstof det er økonomisk rationelt at fordele til sædskiftet ( $x^*$ ) ved en given kvælstofpris, og 4) angiver syntetiske N-LES 4 parametre (Syntetic) for sædskiftet.

**Tabel B3.** Typesædskifte med parametre for optimal kvælstoftildeling samt syntetiske N-LES parametre

			x*(w) LER/SND				Syntetic N LES4 param		
Sædskifte	efta	Visa	max	slop LER	slop SND	bend	NLES	slop	break
01_sroe_vasa_visa	33%	33%	189	-4	-4	13	-30	0,00	150
02_vase_frøg_frøg_visa	25%	25%	193	-3	-4	13	-53	-0,03	150
03_kart_vasa_visa	0%	33%	214	-4	-4	13	-30	0,00	150
04_raps_visa_vasa_visa	0%	50%	244	-6	-7	13	-23	-0,01	150
05_majs_majs	0%	0%	216	-3	-3	13	8	0,00	150
06_klgr_klgr_vase	33%	33%	478	-29	-27	13	-57	-0,15	150
07_klgr_klgr_klgr_vase	25%	25%	521	-32	-29	13	-62	-0,15	150
08_vvgr_vvgr	0%	0%	489	-42	-42	13	-88	-0,17	150
09_visa_visa	0%	100%	245	-6	-7	13	-22	0,00	150
10_vasa_visa	0%	50%	220	-5	-6	13	-22	0,00	150
11_vasa_vasa	0%	0%	196	-5	-6	13	-1	0,00	150
12_sroe_vasa_vise	66%	33%	187	-4	-4	13	-38	0,00	150
13_kart_vasa_vise	33%	33%	213	-4	-4	13	-38	0,00	150
14_raps_vise_vasa_visa	25%	50%	243	-6	-7	13	-32	-0,01	150
15_vasa_vise	50%	50%	218	-5	-6	13	-33	-0,01	150
16_vase_vase	100%	0%	191	-5	-6	13	-54	0,00	150

Sædskifterne er identificeret med et nummer 1-16 samt en kode for de 2 til 4 afgrøder, der indgår i sædskiftet. Fx svarer sædskifte 01\_sroe\_vasa\_visa til en fast afgrøderækkefølge med sukkerroer (sroe), vårsæd (vasa) og vintersæd (visa).

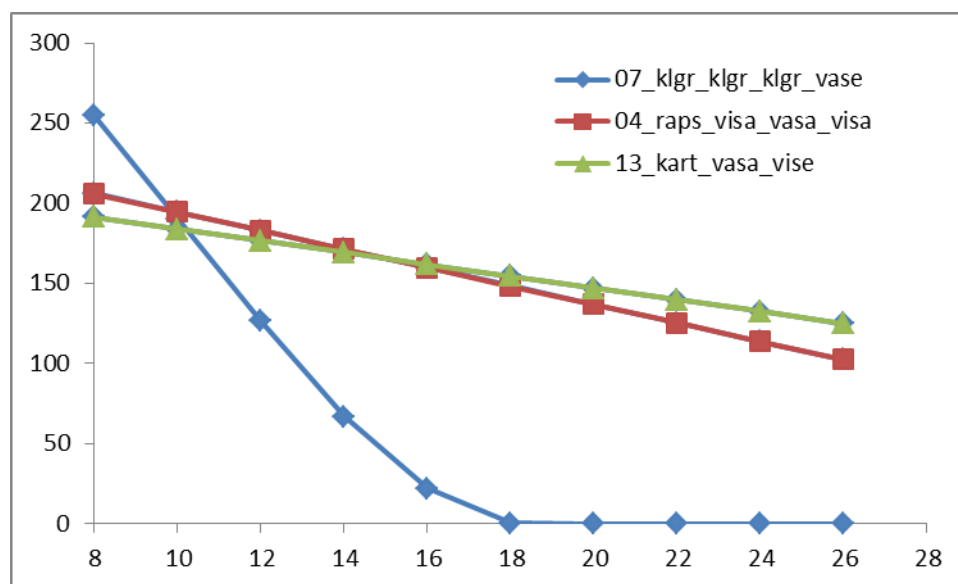
Når afgrødernes kvælstofrespons er beregnet på grundlag af andengradspolynomier, vil den optimale kvælstoftildeling kunne udtrykkes med en simpel lineær funktion. Ved en meget høj kvælstofpris, vil det imidlertid ikke længere være rationelt at tildele kvælstof, hvorfor kurven vil knække ved en tildeling på nul kg N pr. ha. For sædskifter, gælder det imidlertid, at de enkelte afgrøder har forskellige udbytterespons. Nogle afgrøder vil nå knæpunktet før andre, og afgrødernes andel af den samlede tildeling vil ændre sig ved en stigende kvælstofpris. Det betyder, at funktionen for tildeling af kvælstof til et sædskifte ikke er en

knækket lineær kurve, men en pænt bukket kurve. De bukkede kurver har den fordel, at de i modsætning til de lineære, knækkede kurver, er kontinuerte, differentiable for alle kvælstofpriser.

Formel til beregning af optimal kvælstoftildeling ( $x^*$ ) til sædskifte som funktion af kvælstofpris:

$$X^* = \max [1/\text{bend} * \text{LN}(1 + \text{EXP}(\max(1 + \text{slop} * \text{KrprkgN}/\text{max}))) - \text{KgNprDE} (\text{AktDEprha} - 0,8\text{Deprha})]$$

Figur B1 viser kvælstoftildeling (kg N pr. ha) til sædskifte som funktion af kvælstofpris (kr. pr. kg N) beregnet med ovenstående formel samt parametre for sædskifte 7, 4 og 13 på lerjord angivet i tabel B3.



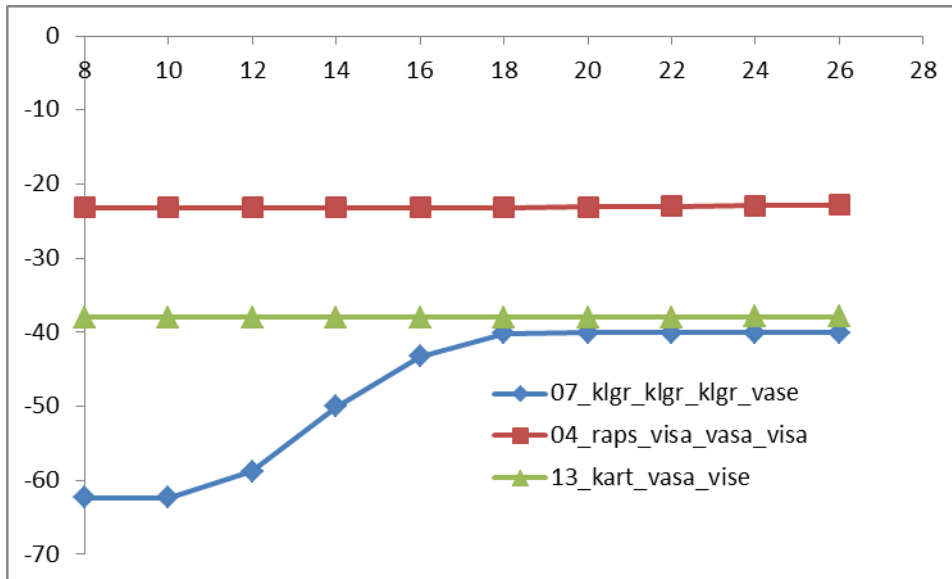
**Figur B1.** Kvælstoftildeling (kg N pr. ha) til sædskifte 7, 14 og 13 som funktion af kvælstofpris (kr. pr. kg N)

Det fremgår af figuren, at kvælstoftildelingen til de tre udvalgte sædskifter, som forventet, reduceres ved en øget kvælstofpris. Ved en meget høj kvælstofpris (her 18 kr. pr. kg N) tildeles der ikke længere kvælstof til sædskiftet med kløvergræs. Ved en lav kvælstofpris, er det til gengæld dette sædskifte, der tildeles mest kvælstof. For de to andre sædskifter, er der en lineær respons. Det bemærkes, at en efterspørgselskurve for kvælstof for en enkelt afgrøde altid vil være lineær, når udbytterespons er baseret på andengrads-polynomier.

Formel til beregning af syntetiske NLES parameter:

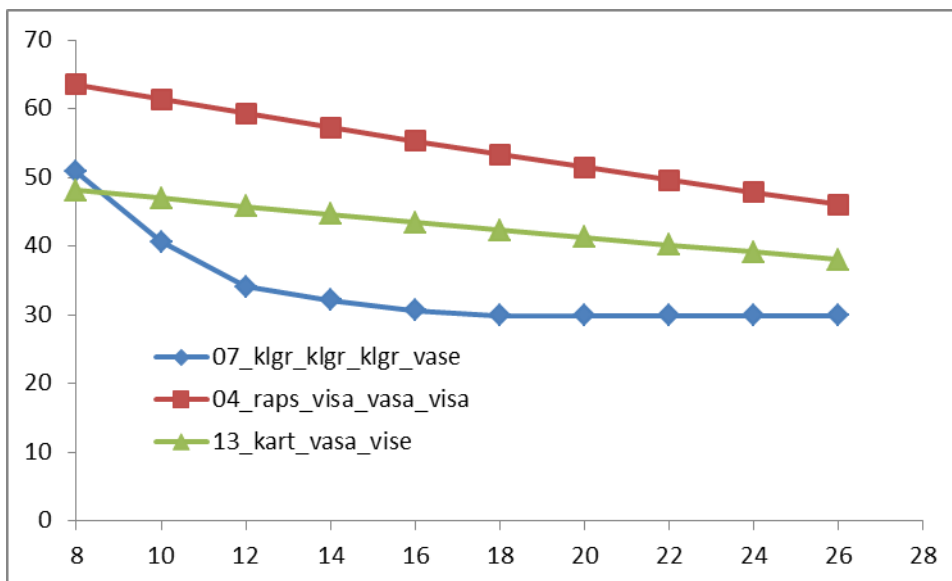
$$NLES_{synt} = NLES + \text{IF}(N < \text{break}; \text{slop}; 0) * (N - \text{break})$$

$NLES$  er SS parameter og  $\text{break}$  samt  $\text{slop}$  er NLES parameter. Estimerede værdier er specificeret i tabel B3.



**Figur B2.** Beregnede syntetiske NLES parameter (SS) for tre sædskifter som funktion af kvælstofpris (8-26 kr. pr. kg N)

Bemærk, at når prisen for kvælstof ændres også den syntetiske SS værdien for sædskiftet ændres. Dette skyldes, at den relative fordeling af kvælstof til afgrøderne, som i tilfældet med kløvergræssædskiftet, kan ændres, når der tildeles mere eller mindre kvælstof til sædskiftet.



**Figur B3.** Beregnet udvaskning (kg N pr. ha) fra tre sædskifter som funktion af kvælstofkvælstofpris (8-26 kr. pr. kg N)

**Tabel B4.** Mulige sædskiftejusteringer

Fuld liste	Version 1	Version 2
01_sroe_vasa_visa	12_sroe_vasa_vise	12_sroe_vasa_vise
02_vase_frøg_frøg_visa	02_vase_frøg_frøg_visa	02_vase_frøg_frøg_visa
03_kart_vasa_visa	13_kart_vasa_vise	13_kart_vasa_vise
04_raps_visa_vasa_visa	14_raps_vise_vasa_visa	14_raps_vise_vasa_visa
05_majs_majs	07_klgr_klgr_klgr_vase	05_majs_majs
06_klgr_klgr_vase	06_klgr_klgr_vase	06_klgr_klgr_vase
07_klgr_klgr_klgr_vase	07_klgr_klgr_klgr_vase	07_klgr_klgr_klgr_vase
08_vvgr_vvgr	08_vvgr_vvgr	08_vvgr_vvgr
09_visa_visa	15_vasa_vise	09_visa_visa
10_vasa_visa	15_vasa_vise	15_vasa_vise
11_vasa_vasa	16_vase_vase	16_vase_vase

Den faktiske arealanvendelse er blevet oversat til de 11 sædskifter på en måde (mindste kvadrats metode), så den resulterende arealanvendelse bedst muligt udtrykker den faktiske arealanvendelse. Herefter er alle sædskifter ændret til deres version 1 udgave. Ved den efterfølgende modellering, kan et sædskifte skifte fra version 1 til version 2, hvis det giver et højere dækningsbidrag med de givne skyggepriser, og alle sædskifter, der ikke producerer grovfoder (dvs. 5, 6 og 7) kan skifte til sædskifte 8 med vedvarende græs, svarende til udtagning, hvis det giver et højere dækningsbidrag. Derudover er det en mulighed, at version 1 sædskiftet for en merudgift på fx 800 kr. pr. ha kan tilsluttes et minivådområde, der reducerer udledningen med fx 25 pct. for lerjord og det halve (fx 12,5 pct.) på sandjord.

Dækningsbidraget,  $P$ , for et sædskifte er beregnet med følgende formel:

$$P(x) = Yp \left( 2 \frac{(x + x_0)}{\hat{x}} - \left( \frac{(x + x_0)}{\hat{x}} \right)^2 \right) - wx - C$$

hvor  $Yp$  er maksimal produktionsværdi,  $C$  er faste omkostninger og  $x$  er kvælstoftildeling. Parametrene  $Yp, \hat{x}, x_0$  fremgår af tabel B5.

**Tabel B5.** Parametre til beregning af dækningsbidrag for sædskifter

Sædskifte	LER				SAND			
	$Yp$	$\hat{x}$	$x_0$	$C$	$Yp$	$\hat{x}$	$x_0$	$C$
1	12.648	308	117	6.223	10.497	341	138	6.568
2	11.616	288	92	4.375	10.956	333	126	4.931
3	20.366	386	172	10.630	19.557	463	235	11.258
4	10.275	325	88	4.841	8.819	330	91	5.230
5	12.876	284	68	8.090	13.068	284	68	8.354
6	9.845	755	277	4.944	10.356	740	262	6.751
7	10.053	805	282	5.155	10.740	792	270	7.137
8	4.992	652	156	1.445	4.992	652	156	1.683
9	10.020	314	77	5.199	8.356	321	81	5.571
10	8.727	287	72	4.470	7.490	291	74	4.911
11	7.434	255	65	3.741	6.624	261	68	4.251
12	12.648	309	120	6.334	10.497	343	141	6.679
13	20.366	387	175	10.741	19.557	467	240	11.369
14	10.275	326	89	4.924	8.819	331	92	5.313
15	8.727	287	75	4.636	7.490	291	77	5.078
16	7.434	257	71	4.074	6.624	262	73	4.584